

IVW - Schriftenreihe Band 32

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Guido Beresheim

Thermoplast-Tapelegen – ganzheitliche
Prozessanalyse und -entwicklung

Bibliografische Information Der Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Erwin-Schrödinger-Straße
Universität Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck
D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2002

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X
ISBN 3-934930-28-X

Thermoplast-Tapelegen – ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung

Vom Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Guido Beresheim

aus Neuwied

Tag der mündlichen Prüfung: 2. September 2002

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H.-D. Hellmann

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Neitzel

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) an der Universität Kaiserslautern.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Neitzel und Herrn Dr.-Ing. Mitschang für die Betreuung und Förderung meiner Arbeit sowie für die gewährten Freiräume, insbesondere im Rahmen des Forschungsaufenthaltes in Boston. Für die Übernahme des Korreferats und die anregende Diskussion danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Brockmann. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Hellmann für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Darüber hinaus danke ich besonders Herrn Prof. Gutowski Ph.D., Leiter des Laboratory for Manufacturing and Productivity am Massachusetts Institute of Technology, für die temporäre Aufnahme an seinem Lehrstuhl und die enge Betreuung, so dass ich die dort erarbeiteten Inhalte zum Hauptteil meiner Arbeit ausbauen konnte.

Wesentliche Anregungen zur Erstellung der Arbeit und auch die Finanzierung der Forschungsarbeiten verdanke ich der Zusammenarbeit mit der Airbus Deutschland GmbH sowie der Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Den Mitarbeitern des IVW, den studentischen Hilfskräften sowie den Studien-/Diplomarbeitern, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, danke ich für die fachliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Hierbei bin ich für das überdurchschnittliche Engagement von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Lichtner und Herrn Weick zu besonderem Dank verpflichtet. Außerdem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Karger-Kocsis (IVW) und Herrn Dr.-Ing. Breuer (Airbus Deutschland GmbH), die mir in vielen kritischen Gesprächen wertvolle Anregungen für die Arbeit gaben.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Frau, meinen Eltern und meiner Schwester, die mich während der gesamten Zeit unterstützt haben und mir immer zur Seite standen. Ohne ihr Vertrauen, ihren Rückhalt und ihr unermüdliches Verständnis wäre alles in dieser Form nicht möglich gewesen.

für Ernst

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abstract.....	VI
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....	VII
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Methodik der Arbeit.....	3
2 Thermoplast-Tapelegeverfahren – Stand der Technik.....	4
2.1 Geschichtliche Entwicklung des Tapelegeverfahrens	4
2.2 Beschreibung des Thermoplast-Tapelegeprozesses	7
2.3 Abgrenzung der Tapelegeverfahren.....	10
2.4 Defizite und Entwicklungsfelder des Thermoplast-Tapelegens	12
2.5 Stand der Technik der Thermoplast-Tapelegeanlagen	17
2.5.1 Automated Dynamics Ltd. (ADC).....	18
2.5.2 ABB Corporate Research	18
2.5.3 EADS – CRC	19
2.5.4 NASA – Langley Research Center	20
2.5.5 Center for Composite Materials (CCM), Universität Delaware.....	21
2.5.6 Cincinnati Machine	22
2.5.7 Institut für Produktionstechnologie (IPT).....	23
2.5.8 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW).....	25
3 Analyse des Thermoplast-Tapelegeprozesses	27
3.1 Strategische Prozessanalyse	27
3.2 Operative Prozessanalyse	31
4 Untersuchungen zur Prozessentwicklung	35
4.1 Erfassung und Bewertung der Qualität von Thermoplast-Tapes	35

4.1.1	Kriterien zur Erfassung der Qualität von Thermoplast-Tapes	35
4.1.2	Untersuchung der Qualität von Thermoplast-Tapes	37
4.1.3	Entwicklung und Umsetzung eines Qualitätskennzahlensystems ...	46
4.1.4	Relevanz der Qualitätskriterien für den Ablegeprozess	49
4.2	Erstlagenproblem	51
4.2.1	Bisherige und mögliche neue Lösungsansätze	52
4.2.2	Erstlagenanhaftung mit Hilfe der Elektrostatik	53
4.2.3	Erstlagenanhaftung mit Hilfe der Adhäsion	56
4.3	Temperaturführung	61
4.3.1	Analyse des Brennflecks bei der Flammheizung	61
4.3.2	Temperierung der Konsolidierungsrolle	64
4.3.3	Temperierung der Werkzeugplattform	65
4.4	Ablegeverhalten faserverstärkter Thermoplast-Tapes	67
4.4.1	Defizite bei der Konsolidierung	67
4.4.2	Effekte beim Ablegen von gekrümmten Bahnen	70
4.4.3	Modell zum Ablegen von gekrümmten Bahnen	74
4.5	Optimierung der Anlagentechnik	77
4.5.1	Weiterentwicklung des Tapelegekopfes	77
4.5.2	Steuerung des Prozesses	80
4.5.3	Ansetzen und Absetzen der Ablegebahn	81
4.6	Ablegeversuche und Ermittlung von Verarbeitungsparametern	83
4.7	Aspekte zum Qualitätsmanagement des Gesamtprozesses	88
5	Modellierung des Thermoplast-Tapelegeprozesses	91
5.1	Prozess-basierte Kostenmodellierung	91
5.2	Abstraktion und Definition von Bauteilformkomplexität	93
5.3	Modell für die Komplexitäts-basierte Abschätzung der Fertigungszeit	96
5.3.1	Bisherige Theorien und Annahmen zur Messung von Komplexität .	96
5.3.2	Modell auf Basis der Prozessunterbrechung	101
5.4	Anwendung des Modells	113
6	Erweiterung des Bauteilspektrums durch Verfahrenskombination	118

7	Zusammenfassung.....	120
	Literaturverzeichnis	122
	Anhang	135

Abstract

The tape placement technique is of particular importance for the production of large and weight optimized structural components especially in the aeronautic industry. The components are produced independently of size and load directions by placing single unidirectional fiber reinforced tapes automatically. Moreover, very large component dimensions enable a reduction of joining processes.

In comparison to the thermoset tape placement, additional potentials can be set up through the usage of thermoplastic semi-finished materials, as beside the high degree of integration und the defined laminate construction less material specific problems and a non-autoclave production can be realized. This thesis follows an all-embracing analyses and development of the thermoplastic tape placement process to provide knowledge to overcome the deficits concerning semi-finished materials, systems engineering and available models for the process description.

First, the process is described and differentiated. Within the scope of a strategic process analyses, the potentials and strength of this process are worked out. Through a succeeding operational process analyses, the process is pictured in detail and further developments of the process and the control are made possible.

All aspects of the process in terms of quality of the semi-finished material, systems engineering, process control, and quality assurance are considered for the process development. Innovative concepts to solve the first layer problem and a new tape placement head are worked out.

A new model is developed to support strategic decisions on basis of component specific cycle times. A measure for the component shape complexity is derived and integrated into a continuous approach. The model is based on the process physics and can be applied to any component without a need for empiric data.

Finally, new process potentials are presented through a combination of thermoforming and thermoplastic tape placement.

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
\bar{i}	[bit]	Durchschnittlicher Informationsgehalt
\dot{q}	[J]	Wärmestrom
δ	[]	Polynom 2. Grades
β	[]	Polynom 2. Grades
γ	[]	Polynom 2. Grades
ϕ	[]	Polynom 2. Grades
α	[]	Power Law Funktion
ε	[%]	Dehnung
Φ	[%]	Faservolumengehalt
ζ	[°]	Ablegewinkel in Abhängigkeit der Kantenorientierung
ψ	[°]	Ablegewinkel, Faserwinkel
φ	[°]	Winkel der Ablegekurve
\bar{X}	[μm]	Durchschnittlicher Aufenthaltsort in X-Richtung
ξ	[μm]	Faserabstand in X- bzw. Y-Richtung
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit
λ	[mm]	Sekante einer Schwingung
τ	[MPa]	Scherfestigkeit
σ	[MPa]	Zugfestigkeit
η	[Pa*s]	Viskosität
$\kappa(s)$	[1/m]	Krümmung einer Bahn
$\varphi(s)$	[m]	Krümmungsradius einer Bahn
ε_0	[C/(V*m)]	Elektrische Feldkonstante (= $8,854 \cdot 10^{-12}$)
θ_g	[°]	In-plane-shearing-Winkel der Kante
ε_{\max}	[%]	Maximale Dehnung
$\varepsilon_{\max}^{\text{neu}}$	[%]	Maximale Dehnung durch Erhöhung der Faserlänge
θ_n	[°]	Out-of-plane-Winkel der Kante
$\theta_{n\zeta}$	[°]	Out-of-plane-Winkel der im Winkel ζ überquerten Kante
ε_r	[]	Permittivitätszahl

Δt_a	[h]	Prozessverspätung durch Beschl./Verz. an der Kante im Winkel ζ
$\Delta t_{ce\zeta}$	[h]	Prozessverspätung durch Überqueren der Kante im Winkel ζ
$\Delta t_{ce\zeta, ges}$	[h]	Gesamte Prozessverspätung beim Überqueren der Kante im Winkel ζ
a	[m/s ²]	Beschleunigung der Maschine
A_B	[μm^2]	Tapequerschnittsfläche
A_F	[μm^2]	Faserquerschnittsfläche
b	[μm]	Tapebreite
d	[μm]	Tapedicke
d_F	[μm]	Faserdurchmesser
d_i	[m]	Dicke der Isolationsschicht
d_{KR}	[m]	Durchmesser der Konsolidierungsrolle
d_r	[μm]	Resultierende Tapedicke
E	[MPa]	E-Modul
E^*	[MPa]	Komplexer Biegemodul
E_D	[V/m]	Durchschlagfestigkeit
f	[m]	Laufvariable der Spiralfunktion
F	[N]	Kraft
F_G	[N]	Gewichtskraft
g_{ji}	[%]	Gewichtungsfaktor
h_{ce}	[m]	Länge einer Kante
I	[bit]	Informationsgehalt
K_K	[]	Kantenwert aus der Transformationstabelle
l	[mm]	Länge einer geraden Faser
l'	[mm]	Länge einer gekrümmten Faser
L_0	[m]	Länge des Bauteils
L_a	[m]	Länge der Außenkurve
l_{ad}	[m]	Adaptionsstrecke des Roboters
$l_{ad\zeta}$	[m]	Adaptionsstrecke des Roboters im Winkel ζ
l_{ce}	[m]	Länge der Kantenüberquerung
$l_{ce\zeta}$	[m]	Länge der im Winkel ζ überquerten Kante

L_i	[m]	Länge der Innenkurve
$l_{KR\zeta}$	[m]	Überquerungslänge der Rolle der im Winkel ζ überquerten Kante
l^{neu}	[mm]	Länge der Faser nach Streckung
l_{slow}	[m]	Überquerungslänge der im Winkel ζ überquerten Kante
L_{TLK}	[m]	Länge des Tapelegekopfes
M_a	[]	Qualitätswert für den makroskopischen Qualitätscluster
M_e	[]	Qualitätswert für den mechanischen Qualitätscluster
M_i	[]	Qualitätswert für den mikroskopischen Qualitätscluster
n	[]	Anzahl der Fasern
N	[]	Anzahl der Informationen
N_{ce}	[]	Anzahl der überquerten Kanten
N_L	[]	Anzahl der Lagen
n_s	[]	Anzahl der Bahnen
n_x	[]	Anzahl der Faserspalten
n_y	[]	Anzahl der Faserreihen
OA	[mm]	Ondulierungs-Amplitude
P	[%]	Porengehalt
p	[bar]	Druck des Andrückzylinders der Konsolidierungsrolle
p_i	[%]	Auftrittswahrscheinlichkeit einer Nachricht
QC	[]	Qualitätscluster
$QITT$	[]	Quality Index for Thermoplastic Tapes
Q_k	[]	Qualitätskriterium
Q_w	[]	Qualitätswert
r	[mm]	Ablegeradius
R^2	[%]	Korrelationskoeffizient
R_a	[μ m]	Mittenrautiefe
r_{ce}	[m]	Radius der überquerten Kante
$r_{ce\zeta}$	[m]	Radius der im Winkel ζ überquerten Kante
$r_{ce\zeta,grenz}$	[m]	Grenzradius der im Winkel ζ überquerten Kante
r_{down}	[%]	Anteil der Maschinenstillstandszeit
r_F	[μ m]	Faserradius
r_m	[mm]	Ablegeradius in der Tapemitte

R_{\max}	[μm]	Maximale Rautiefe
S	[]	Anzahl der Schwingungen auf 360°
s	[μm]	Standardabweichung
s_a	[m]	Strecke für die Beschleunigung/Verzögerung
s_r	[μm]	Resultierende Standardabweichung
s_x	[μm]	Standardabweichung in X-Richtung
s_y	[μm]	Standardabweichung in Y-Richtung
T	[$^\circ\text{C}$]	Temperatur
t_0	[h]	Zeit für die Beschleunigung/Verzögerung-Strecke bei v_0
t_A	[h]	Bauteilfläche-bezogene Zykluszeit
t_a	[h]	Zeit für die Beschleunigung/Verzögerung
t_{ac}	[h]	Zeit zum Beschleunigen auf v_0
t_{ad}	[h]	Zeit für die Adaptionbewegung an der Kante
$t_{ad\zeta}$	[h]	Zeit für die Adaptionbewegung im Winkel ζ an der Kante
t_{ce}	[h]	Zeit zum Überqueren der Kante
$t_{ce\zeta}$	[h]	Zeit zum Überqueren der Kante im Winkel ζ
t_{dead}	[h]	Totzeit des Tapelegekopfes
t_{dec}	[h]	Zeit zum Verzögern auf die Kantengeschwindigkeit
t_p	[h]	Zykluszeit für das Tapelegen
T_X	[m]	X-Transformationsvektor
T_Y	[m]	Y-Transformationsvektor
U	[V]	Spannung
v	[m/min]	Ablegegeschwindigkeit
v_0	[m/min]	Grundablegegeschwindigkeit
Var	[%]	Variationskoeffizient
Var_B	[%]	Variationskoeffizient der Tapebreite
Var_D	[%]	Variationskoeffizient der Tapedicke
Var_F	[%]	Variationskoeffizient des Faservolumengehalts
v_B	[m/min]	Bahngeschwindigkeit
v_{ce}	[m/min]	Geschwindigkeit beim Überqueren der Kante
$v_{ce\zeta}$	[m/min]	Geschwindigkeit beim Überqueren der Kante im Winkel ζ
$v_{\max\text{Mach}}$	[m/s]	Maximale Bahngeschwindigkeit der Maschine
w	[mm]	Ablegebreite des Tapes

W_0	[m]	Breite des Bauteils
w_{ce}	[m]	Ablegebreite an der Kante unter dem Winkel ζ
\bar{X}	[μm]	Durchschnittlicher Aufenthaltsort in X-Richtung
x_i	[μm]	Aufenthaltsort einer Faser in X-Richtung
X_T	[μm]	Transformierte X-Werte
Y_T	[μm]	Transformierte Y-Werte

Abkürzungsverzeichnis

Kurzform	Beschreibung
ABB	Asea Brown Boveri AG
ADC	Automated Dynamics Ltd.
AF	Aramidfaser
APC [®]	Produktbezeichnung für Tapes der Firma Cytec Fiberite
Ar	Ausriss
AVK-TV	Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe – Technische Vereinigung e.V.
AVSD	Automated Variable Strand Dispensing
Beschl.	Beschleunigung
Bsp.	Beispiel
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCM	Center for Composite Materials, University of Delaware, Newark, USA
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Cytec Fib.	Cytec Fiberite
DDK	Dynamische Differenz-Kalorimetrie (englisch: DSC)
Dig.	Digital
DMTA	Dynamisch-Mechanische Thermo-Analyse
DP	Duroplast
DSC	Differential Scanning Calorimetry (deutsch: DDK)
EADS – CRC	European Aeronautic for Defence and Space Company – Corporate Research Center
Ek	Einknicken
Evo I	Evolutionsstufe I
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
Flex Co.	Flex Composites
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie

FÜ	Faltenüberwurf
Fvol%.	Faservolumengehalt
FZP	Faltenbildung mit zyklischer Progression
Geschwind.	Geschwindigkeit
GF	Glasfaser
ggf.	gegebenenfalls
Gurit Sup.	Gurit Suprem, Winterthur, Schweiz (früher: Sulzer Composites)
HDPE	High Density Polyethylen
Hg	großer Haken
Hk	kleiner Haken
inkl.	inklusive
IPT	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik, Universität Aachen
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Universität Kaiserslautern
k.A.	Keine Angaben
Kap.	Kapitel
K _i	Komplexität der Interaktion
K _s	Komplexität des Zustands
LARC	NASA - Langley Research Center, Virginia, USA
Lr	Lunker mit Riss
Max.	Maximal
Min.	Minimal
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NC	Numeric Control
PA	Polyamid
PBKM	Prozess-basierte Kostenmodellierung
PC	Personal Computer
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PVC	Polyvinylchlorid

PVDF	Polyvinylidenflurid,
QKS	Qualitätskennzahlensystem
QKZ	Qualitätskennzahl
QM	Qualitätsmanagement
QS	Qualitätssicherung
Qw	Qualitätswert
R	Rechteckig
Rd	Rechteckig mit Deformation
REM	Rasterelektronenmikroskop
S.	Seite
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SBS	Short Beam Shear Test
Scherfstkt.	Scherfestigkeit
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SW	Sollwert
T _g	Glasübergangstemperatur
TL	Tapelegen
TLK	Tapelegekopf
TP	Thermoplast
TPI	Thermoplastisches Polyimid
TS	Technisches System
UD	Unidirektional
Ve	Verschmierung
Verz.	Verzögerung
WID	Kleine Wellen auf der Innenseite in Dickenrichtung
WZ	Werkzeug
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Innovationen entstehen meist in der Wechselbeziehung zwischen dem Markt und der Technologie. Entweder werden neue Entwicklungen durch Bedürfnisse der Kunden angestoßen (Market Pull) oder sie sind die direkte Folge vorangegangener Entwicklungen bzw. einer Idee (Technology Push) [1]. Im Allgemeinen handelt es sich um ein Wechselspiel beider Ansätze, deren Gewichtung sich je nach Technologielebensphase unterscheidet. So erfolgt meist am Ende des Technologielebenszyklus die Substitution der alten Technologie durch eine effizientere und wirtschaftlichere.

Schon seit langem haben Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) durch die immer steigenden Anforderungen an das gewichtsspezifische Bauteilleistungsvermögen in die industrielle Fertigung Einzug gehalten und metallische Werkstoffe substituiert. Je nach Verarbeitungsverfahren, Werkstoff und Branche erfolgt die Marktdurchdringung der verschiedenen FKV-Verarbeitungsverfahren jedoch schleppend. Hauptargument für den Verzicht auf die Einführung von FKV im Vergleich zu Metallen sind hohe Anlagen- und Werkstoffkosten. Technologiebezogen können diese nur durch eine Steigerung des Automatisierungsgrads und Mengendegressionen reduziert werden. Da jedoch die erforderlichen Entwicklungen und die technologische Marktdurchdringung vergleichsweise langsam erfolgen, bleiben die Fertigungsprozesse lange teuer. Daher werden viele neue Entwicklungen zunächst in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt [2], wo der Werkstoff (z.B. durch das Gewichtssenkungspotenzial) spezifisch wertvoller ist als in anderen Branchen.

Die hohen Anforderungen der Luftfahrtindustrie hinsichtlich beanspruchungsgerechter, gewichtsspezifischer Bauteileigenschaften in Verbindung mit dem Ziel verbesserter Automation führten in den 60er und 70er Jahren zur Entwicklung der Duroplast-Tapelegeverfahren. Durch das sukzessive Ablegen unidirektional faserverstärkter Prepreg-Tapes können Bauteile gewichtsoptimiert automatisiert hergestellt werden. Das Duroplast-Tapelegen wird mittlerweile mit Erfolg für unterschiedlichste Bauteile eingesetzt [3]. Dabei haben sich sowohl das Ablegen eines einzelnen breiten Tapes als auch das Ablegen von mehreren schmalen Tapes etabliert [4, 5].

Die Verarbeitung von duroplastischen FKV hat jedoch im Vergleich zur Thermoplastverarbeitung die wesentlichen Nachteile einer wartungs-/reinigungsintensiven Fertigung und des nachgeschalteten, sehr kosten- und zeitintensiven Autoklaveinsatzes.

Bezogen auf den Technologielebenszyklus kann daher die Gesamttechnik durch die Innovation des Thermoplast-Tapelegens substituiert werden. Die Thermoplast-Tapelegetechnik besitzt durch die Prozessautomatisierung und Online-Konsolidierung der Thermoplast-Tapes ein wirtschaftliches Potenzial, so dass von der Entwicklung des Verfahrens ein „Technologie Push“ insbesondere hinsichtlich der Marktdurchdringung thermoplastischer FKV zu erwarten ist.

Die bisherigen Entwicklungsarbeiten zum Thermoplast-Tapelegen beschränken sich fast ausschließlich auf Laborarbeiten, die noch keinen durchschlagenden Erfolg hatten. Vielfach konnten grundlegende Defizite des Verfahrens nicht gelöst werden, so dass das Thermoplast-Tapelegeverfahren bisher nicht in der Serienfertigung eingesetzt wird. Zudem sind prozessübergreifende Problemstellungen hinsichtlich der Verfahrensabgrenzung, -einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit praktisch nicht bearbeitet, so dass der Prozess in seiner Gesamtheit noch entwickelt werden muss.

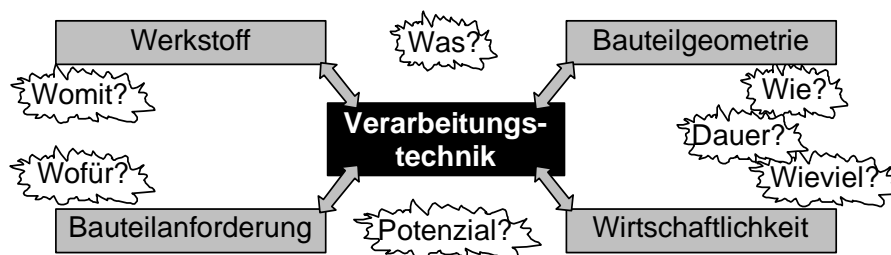


Bild 1.1: Spannungsfeld der Verarbeitungstechnik

Zur Entwicklung eines Verarbeitungsprozesses muss die Verarbeitungstechnik in ihrem Gesamtkontext betrachtet werden (Bild 1.1). Danach besteht eine starke Wechselwirkung der Verarbeitungstechnik mit den Bauteilanforderungen, insbesondere der Bauteilgeometrie, dem Werkstoff und der Wirtschaftlichkeit. Dieses Spannungsfeld wirft eine Vielzahl von Fragen auf, die für einen effektiven, sinnvollen und wirtschaftlichen Einsatz eines Prozesses geklärt werden müssen und für den Thermoplast-Tapelegeprozess bislang noch offen geblieben sind. Daher kann eine Prozessentwicklung nur ganzheitlich erfolgen, da sonst nicht nur Problemfelder zu spät erkannt, sondern auch Chancen für wesentliche Innovationen vertan werden.

1.1 Zielsetzung und Methodik der Arbeit

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Entwicklung eines serientauglichen Thermoplast-Tapelegeprozesses leisten. Es erfolgt dazu eine ganzheitliche Prozessbetrachtung. Ausgangspunkt ist eine Prozessdefinition, in der eine Beschreibung der Prozessfunktionalitäten sowie eine Determinierung der Prozessanforderungen, -defizite und -grenzen des Verfahrens erfolgt. Bild 1.2 zeigt die vier Hauptziele und die zugehörigen Vorgehensweisen. Diese sind in ihrer Zielverfolgung komplementär vernetzt.

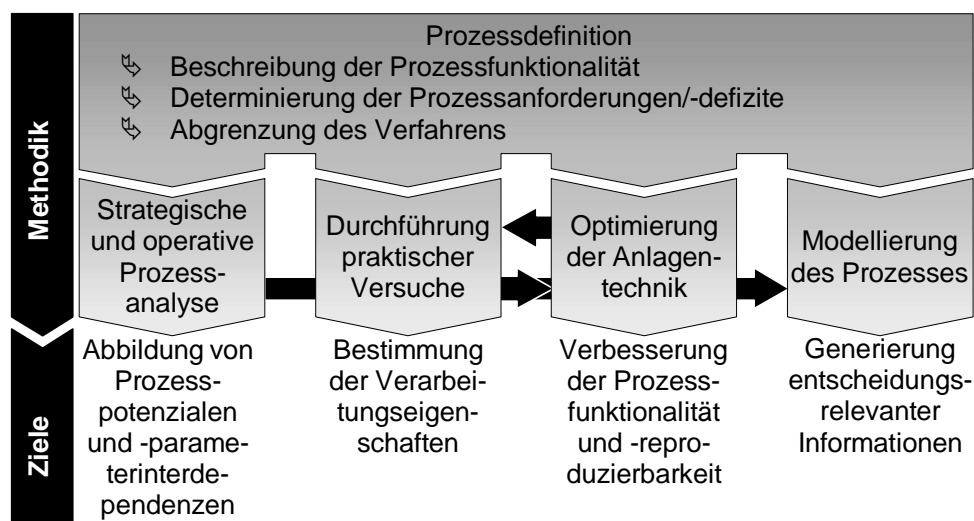


Bild 1.2: Methodik und Ziele der Arbeit

Die Abbildung von Prozesspotenzialen und -parameterinterdependenzen auf Basis einer strategischen und operativen Prozessanalyse dient der Ermittlung des Leistungsvermögens des Verfahrens sowie der Sensibilisierung für die Details des Prozessablaufs. Zudem sollen die Ergebnisse dieser Analyse die Richtung der anlagentechnischen Entwicklungen vorgeben. Diese erfolgen aber im wesentlichen auf Basis der praktischen Untersuchungen zur Ermittlung der Verarbeitungseigenschaften. Ziel der anlagentechnischen Entwicklung ist die Verbesserung der Funktionalität und Reproduzierbarkeit des Prozesses. Alle Erfahrungen und Ergebnisse der ersten drei Entwicklungsblöcke fließen dann in die Prozessmodellierung ein. Hiermit wird das Ziel verfolgt, durch Modellierung der Zykluszeit ein Instrument zur Generierung von Informationen für Investitions- oder prozessrelevante Entscheidungen zu schaffen.

2 Thermoplast-Tapelegeverfahren – Stand der Technik

2.1 Geschichtliche Entwicklung des Tapelegeverfahrens

Mit dem Begriff Tapelegen wird das automatisierte richtungs- und positionsvariable Ablegen von unidirektional faserverstärkten Kunststoff-Tapes auf ebenen oder gekrümmten, flächigen Strukturen bezeichnet. Tapelegen ermöglicht die Herstellung sehr großer, funktions- und beanspruchungsgerechter Bauteile mit definierten Laminatdicken. Das Tapelegeverfahren entstand in den 60er Jahren aus dem Bedürfnis, automatisiert große Flugzeugrumpfstrukturen herzustellen. Ziel war es, einen geringen Treibstoffverbrauch bei gleichzeitig großer Lastaufnahme mit Hilfe eines extrem steifen Leichtbaus zu realisieren. Zudem sollte die Konstruktion einen geringen Wartungs- und Instandhaltungsaufwand durch Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Geeignete Halbzeuge zur Erreichung der Ziele sind unidirektional verstärkte FKV-Tapes. Jedoch zeigten damalige Studien, dass manuell hergestellte FKV-Komponenten etwa 2 bis 3 mal so teuer sind wie metallische. Demzufolge musste ein höherer Automatisierungsgrad für den Einsatz von FKV erreicht werden. Einziges vollautomatisiertes Verfahren, das die Herstellung von sehr großen Bauteilen ermöglichte, war zu dieser Zeit das Wickelverfahren. Als erstes Verfahren wurde daher eine Art Ringwickelverfahren konzipiert (Bild 2.1).

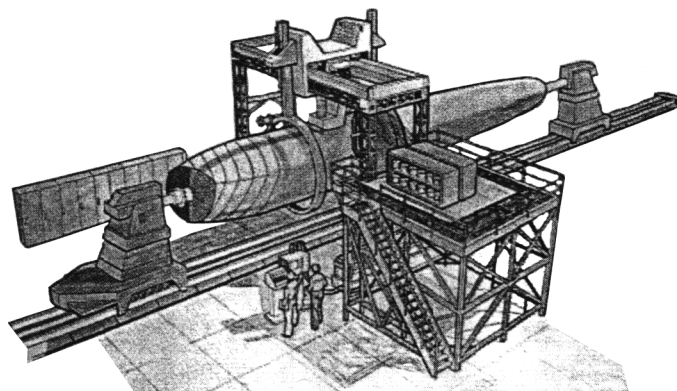


Bild 2.1: Erstes Konzept zur automatisierten Herstellung von Rumpfstrukturen [6]

Nachteilig an diesem Konzept war die vergleichsweise schlechte Materialausnutzung, da die Positionierung und Orientierung der Halbzeuge nicht frei wählbar und

die Bauteilgeometrie auf konvex-geschlossene bzw. rotationssymmetrische Formen beschränkt war. Demgegenüber konnte mit Hilfe des Handablegens von unidirektional verstärkten Prepregs das Material beanspruchungsgerechter und sparsamer eingesetzt werden. Von Nachteil war hierbei die höhere Ungenauigkeit beim Ablegen und die schlechte Handhabbarkeit bei großflächigen Bauteilen. Später waren sogenannte „Flintstone“-Maschinen [7] (handgeführte Ablegegeräte) zum teilautomatisierten Ablegen auf ebenen Oberflächen verfügbar, die das Handablegen maschinell unterstützten [8]. In einem weiteren Entwicklungsschritt wurden NC-Tapelegemaschinen eingesetzt, die bereits vollautomatisiert arbeiteten. Jedoch konnten hiermit auch nur ebene Lamine hergestellt werden [9]. Folglich musste ein neues Verfahren entwickelt werden, das die automatisierte, kostengünstige Produktion von großen, unidirektional faserverstärkten Kunststoffbauteilen ermöglichte. Studien prognostizierten für ein solches Verfahren eine mögliche Kostenersparnis im Vergleich zum Handablegen von etwa 45 %. Realisiert wurden später eine Kostenersparnis von bis zu 50 % und eine Reduzierung des Abfalls von bis zu 75 % [6].

Als Synthese aus den bereits existierenden Verfahren entstand das „Automated Variable Strand Dispensing Head“-Konzept (AVSD-Head). Hierdurch wurde die Funktionalität der Anlagentechnik des NC-Tapelegens und das Ablegen von vorimprägnierten Rovings der Wickeltechnik vereint. Basierend auf den ersten Konzepten wurden zunächst Tapelegeanlagen zur Verarbeitung faserverstärkter Duroplast-Tapes entwickelt, die ähnlich dem Handablegen ein einzelnes breites Tape auf ebenen oder leicht gekrümmten Oberflächen ablegen (Kontur-Tapelegen). Seit 1965 wird das Tapelegen für duroplastische Werkstoffe im industriellen Maßstab eingesetzt [10]. 1978 wurde die erste kommerzielle Duroplast-Tapelegeanlage von The Ingersoll Milling Machine Company an General Dynamics ausgeliefert [11]. Das Duroplast-Kontur-Tapelegen (im Englischen „Contour Tape Laying“, „Automated Tape Lay-up“ oder „Tape Laying“ genannt) bezeichnet das Ablegen eines sehr breiten Tapes. Gängige Halbzeugbreiten liegen etwa zwischen 2,5 cm bis 30 cm (1 inch bis 12 inch) [12]. Bei den Tapes auf einer Spule in einer Länge von 305 bis 457 m [13] handelt es sich um vorimprägnierte, unidirektionale Fasern – meist Kohlenstofffasern mit Epoxidharz. Hersteller von Kontur-Tapelegeanlagen sind Cincinnati Machine, The Ingersoll Milling Machine Company und Goldsworthy, alle USA.

Man unterscheidet beim Kontur-Tapelegen je nach Trennung der Schneidvorgänge von den Ablegevorgängen zwischen ein- und zwei-stufigem Legekopf [10, 11, 14, 15]. In der Luftfahrtindustrie war lange der dreistufige Prozess Standard, bei dem der Drapiervorgang erst nach dem Ablegen erfolgte [16]. In der Regel wird jedoch der einstufige Prozess mit Tapebreiten von 7,5 cm oder 15 cm eingesetzt. Abgesehen vom großvolumigen Bauraum solcher Verlegeköpfe können derart breite Tapes quasi nur gerade bzw. geodätisch abgelegt werden. Der Prozess wird daher nur zur Herstellung von sehr großen Strukturen mit geringer Formkomplexität oder zur Herstellung großer, vorkonfektionierter, ebener Lamine eingesetzt. Bisher hergestellte Bauteile sind z.B. die obere Flügelstruktur des B1-Bombers [17] oder die Flügelaußenhaut der V-22 bzw. BA 609 [18, 19, 20]. In Bild 2.2 ist die Fertigung der Flügelaußenhaut des F-22 Raptors dargestellt.



Bild 2.2: Kontur-Tapelegen einer Flügelaußenverschalung des F-22 Raptors [21]

Aus dem Bedürfnis, komplexere Bauteilformen herzustellen, als es mit dem Kontur-Tapelegen möglich ist, wurde in Anlehnung an das AVSD-Konzept das Multi-Tapelegeverfahren zur Verarbeitung faserverstärkter Duroplaste entwickelt (im Englischen „Tow Placement“ oder „Fiber Placement“). Als Halbzeuge kommen 12 bis 32 einzelne vorimprägnierte, unidirektionale Faserbündel zum Einsatz, die einzeln transportiert und geschnitten werden. Dies macht nicht nur die Konstruktion des Tapelegekopfes viel aufwendiger sondern auch dessen Steuerung [22]. Die Tapes, sog. Tows, haben in der Regel eine Breite von 3,175 mm und eine Dicke von

0,1397 mm. Sie werden auf Spulen mit einer Länge von bis zu 12191 m geliefert [13]. Die gängige Spulenlänge beträgt etwa 3350 m [23]. Wie in Bild 2.3 dargestellt, handelt es sich anlagentechnisch um größere Robotereinheiten mit externer Rotationsachse. Auf der Rotationsachse befindet sich die Werkzeugplattform. Hersteller von Multi-Tapelegeanlagen sind Automated Dynamics Ltd., The Ingersoll Milling Machine Company und Cincinnati Machine in den USA. Im Multi-Tapelegeverfahren wurden bereits zahlreiche Bauteile hergestellt [12, 24, 25, 26].



Bild 2.3: Multi-Tapelegeanlage [26]

2.2 Beschreibung des Thermoplast-Tapelegeprozesses

Erst in den 80er Jahren wurden schließlich auch erste Anlagen zur Verarbeitung von thermoplastischen Tapes in Forschungsinstitutionen aufgebaut. Die Anlagentechnik und der Prozess des Tapelegens sind in Bild 2.4 allgemein dargestellt. Zur Positionierung und Orientierung des Tapelegekopfes (TLK) auf großflächigen Strukturen dient in der Regel ein Mehrachsportalsystem. Auf diesem sind sowohl die Tape-Spule als auch der TLK montiert. Die wesentlichen Komponenten des TLK sind die Konsolidierungsvorrichtung, der Schneidemechanismus und die Tapevorschubeinheit. Zum Aufschmelzen des thermoplastischen Tapes ist eine Aufheizvorrichtung installiert.

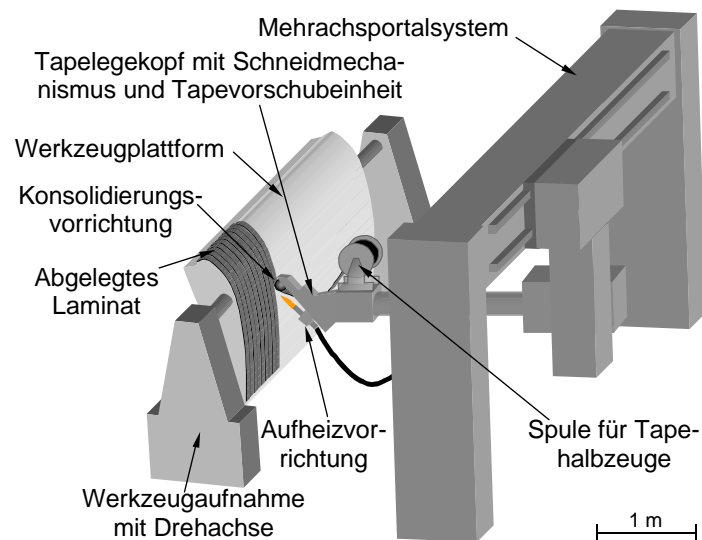


Bild 2.4: Anlagentechnik des Tapelegeprozesses

Beim Thermoplast-Tapelegen sind die Verstärkungsfasern vollständig mit der Matrix imprägniert und konsolidiert und werden als im Querschnitt rechteckig kalibriertes Tape zugeführt. Unabhängig von der Matrix handelt es sich um unidirektional verstärkte Halbzeuge. Das Tape wird zunächst mit Hilfe der Vorschubeinheit von der Halbzeugspule abgezogen, bis zur Konsolidierungsvorrichtung transportiert (Bild 2.5a) und der TLK auf eine meist drehbar gelagerte Werkzeugplattform aufgesetzt.

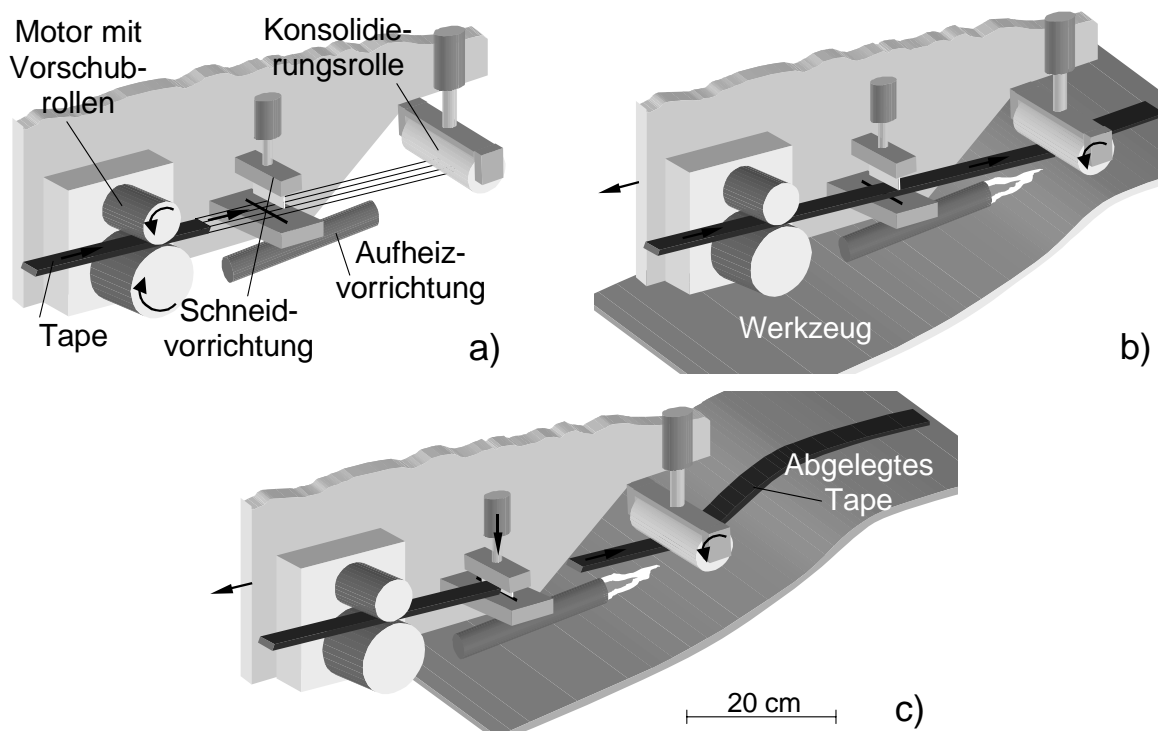


Bild 2.5: Der Tapelegeprozess: Vorschub a), Ansetzen b), Ablegen und Schneiden c)

Das Tape wird nun während des Legeprozesses mit Hilfe der Roboterbewegung und der Konsolidierungsvorrichtung auf der Werkzeugoberfläche abgelegt. Die Thermoplast-Tapes werden „online“ konsolidiert, indem sie mit Hilfe einer leistungsstarken Aufheizvorrichtung (z.B. Flamme oder Laser) über Schmelztemperatur aufgeheizt und unter Applizierung des Konsolidierungsdruckes auf der Werkzeugoberfläche oder dem bereits abgelegten Laminat abgelegt werden (Bild 2.5b). Am Ende einer Bahn wird das Tape durch die Schneideinheit durchtrennt (Bild 2.5c), und der TLK nach der Fertigstellung der Ablage von der Werkzeugplattform abgesetzt. Im Anschluss daran wird zum Ablegen einer neuen Bahn wieder das Tape bis zur Konsolidierungsrolle vortransportiert. Auf diese Weise wird ein Bauteil sukzessive aus vielen einzelnen Tapes aufgebaut. Die einzelnen Prozessschritte sind in Bild 2.6 zusammenfassend dargestellt.

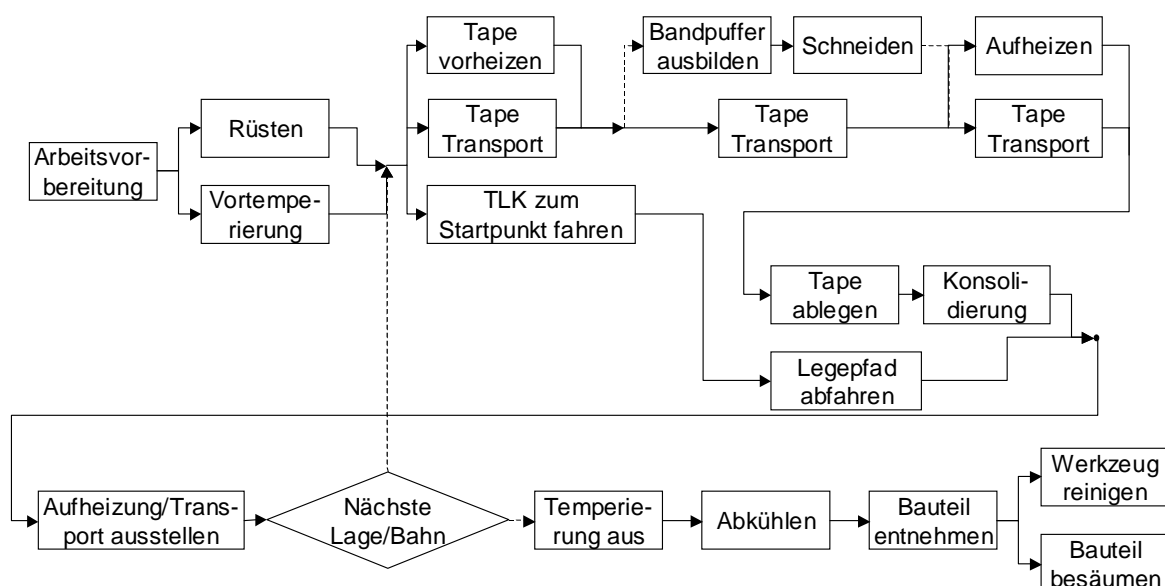


Bild 2.6: Prozessschritte beim Thermoplast-Tapelegen vom Halbzeug bis zum Bauteil

Als besondere Eigenschaft des Tapelegeverfahrens lässt sich festhalten, dass es wenig Einschränkungen hinsichtlich der herstellbaren Bauteilgröße gibt. Lediglich die minimale Bauteilgröße und die Bauteilkomplexität sind begrenzt. Die minimale Bauteilgröße ergibt sich aus der minimalen Schnittlänge eines Tapes, welche sich wiederum aus dem Abstand von Konsolidierungsvorrichtung und Schneide im TLK ergibt. Aufgrund der konstruktiven Eigenart eines TLK sind nur eher gering komplexe Bauteilstrukturen für das Verarbeitungsverfahren möglich. Ebenso lassen sich, in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit, quasi alle am Markt verfügbaren Materialkombi-

nationen prinzipiell mit diesem Verfahren verarbeiten. Die entscheidenden Vorteile des Thermoplast-Tapelegeverfahrens gegenüber herkömmlichen Metall- und FKV-verarbeitenden Verfahren sind in Bild 2.7 dargestellt.

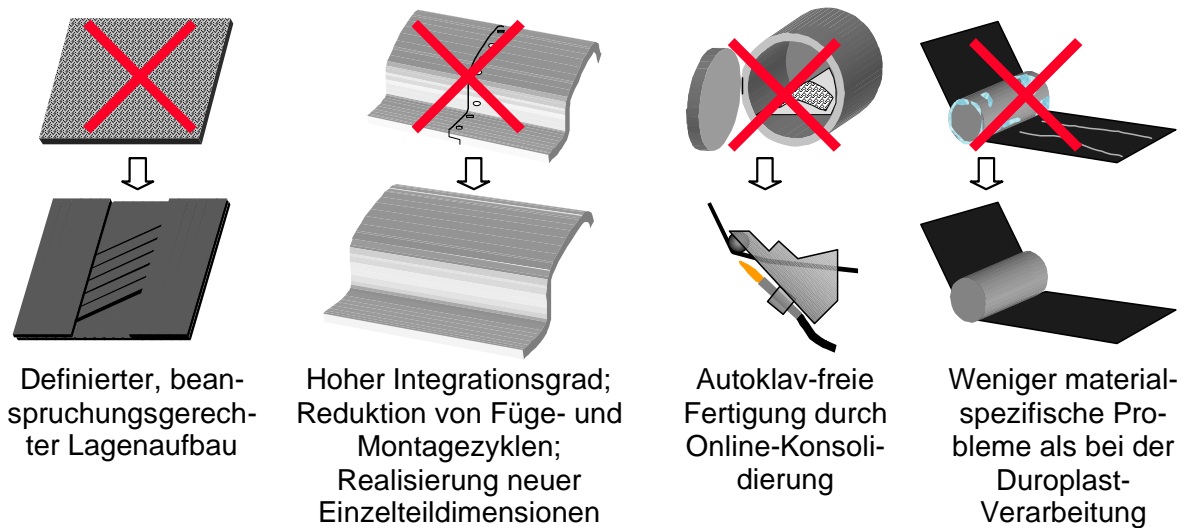
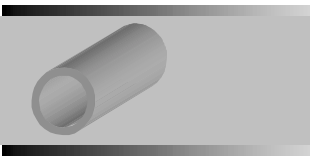
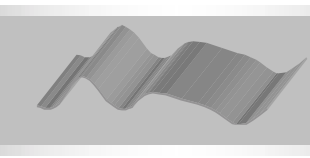
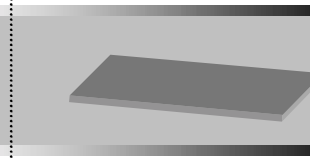
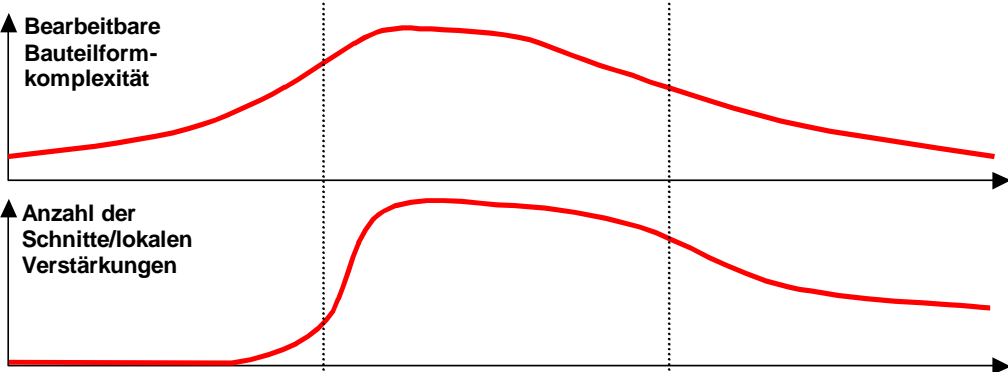


Bild 2.7: Wesentliche Vorteile des Thermoplast-Tapelegeverfahrens

2.3 Abgrenzung der Tapelegeverfahren

„Tapelegen“ wird in der Literatur auch unzureichend gegenüber der Wickeltechnik abgegrenzt sowie zwischen „Multi-Tapelegen“ und „Kontur-Tapelegen“ differenziert. Zwischen den Technologien bzw. Verfahren bestehen trotz des fließenden Übergangs entscheidende Unterschiede (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Abgrenzung der Wickeltechnik von der Tapelegetechnik

Technologie	Wickeln		Tapelegen	
Prozess	Kontinuierlich		Diskontinuierlich	
Halbzeug	Rovings/Tapes/Hybridgarn		Tapes (Rovings/Hybridgarn)	Tape
Anzahl der Halbzeuge	1	bis 24	32	bis 2
Halbzeugbreite	Ca. 3 mm bis ca. 500 mm		3,175 mm bis 15 mm	15 mm bis 300 mm
Verfahren	Wickeltechnik		Multi-Tapelegetechnik	Kontur-Tapelegetechnik
Bauteile	Rotationssymmetrische bzw. gekrümmte Körper mit konvex-geschlossener Oberfläche; keine lokalen Verstärkungen		Große, ebene oder gekrümmte Strukturen mit konvexer und konkaver Oberfläche; mit Stufungen der Bauteildicke bzw. lokalen Verstärkungen	Große, ebene offene Strukturen mit geringfügig konvexer und konkaver Oberfläche; mit Stufungen der Bauteildicke bzw. lokalen Verstärkungen
				
	<p>↑ Bearbeitbare Bauteilformkomplexität</p> <p>↑ Anzahl der Schnitte/lokalen Verstärkungen</p> 			
Konsolidierung/Kompaktierung über	Fadenspannung (ggf. Andrückvorrichtung [27])		Andrückvorrichtung	Andrückvorrichtung
Ablegebahn	Geodätisch bzw. gering davon abweichend		Beliebig, nur von der Drapierbarkeit der Tapes begrenzt	Beliebig, nur von der Drapierbarkeit der Tapes begrenzt
Ablegebreite	Konstant, unvariabel		Variabel (entsprechend Anzahl der Tapes)	Konstant, unvariabel
Faserorientierung	15° bis 88° ohne Hilfsmittel		Beliebig	Beliebig
Faserpositionierung	Lagenweise		Lokal, beliebig	Lokal, beliebig
Förderprinzip	Rotation des Wickelkerns		Abrollen, Vorschubantrieb	Abrollen, Vorschubantrieb
Erforderliche Bewegungsachsen	1-2 rotatorisch, 3 translatorisch		3 rotatorisch, 3 translatorisch	3 rotatorisch, 3 translatorisch
Verfügbarkeit	Anlagen für faserverstärkte Duro- und Thermoplaste		Anlagen für faserverstärkte Duro- und Thermoplaste	Nur Anlagen für faserverstärkte Duroplaste
Anlagenkosten	ca. 0,25 – 0,5 Mio. €		ca. 2 – 4 Mio. €	ca. 1 – 2 Mio. €

2.4 Defizite und Entwicklungsfelder des Thermoplast-Tapelegens

Der sukzessive Aufbau des Laminats aus einzelnen Tapes bringt auch eine Reihe von prozessbedingten Problemen mit sich, die nachteilig sind:

- Aufwendige Generierung eines Legeprogramms auf Basis einer CAD Zeichnung
- Vollständige Bedeckung von nicht abwickelbaren Bauteiloberflächen ist schwierig
- Faltenbildung beim Legen von Kurven
- Lücken und Überlappungen seitlich zwischen den Tapes
- Fixierung der ersten Lage nicht ohne Prozesserweiterung möglich
- Konstruktiv begrenzt herstellbare Bauteilformkomplexität
- Konstruktiv aufwendiger Schneidmechanismus (Genauigkeit und Flexibilität)
- Schwierige Konsolidierung des Bahnanfangs und -endes ohne Bandkraft
- Materialspezifische Verarbeitungsprobleme

Die Überführung einer Bauteilgeometrie in ein Legeprogramm erfolgt in mehreren Iterationsschritten [28]. Dabei wird grundsätzlich versucht, das Tape auf einem „geodätischen Pfad“ (natürlichen Pfad) abzulegen. Darunter versteht man die kürzeste Ablegebahn zwischen zwei Punkten auf einer gekrümmten Oberfläche. Analog werden die davon abweichenden Legebahnen „erzwungene Pfade“ [10, 28] genannt. Diese treten insbesondere bei nicht abwickelbaren Flächen auf [8]. Am Rand des Tapes kommt es ohne Anpassung des Legepfads zu Ablöseerscheinungen. Dies bedeutet aber gleichzeitig auch eine Veränderung des Ablegewinkels und somit eine Änderung der mechanischen Eigenschaften. Das Belegen von nicht-abwickelbaren Oberflächen zieht daher häufig Zwickel zwischen geodätisch abgelegten Pfaden (Bild 2.8) nach sich.

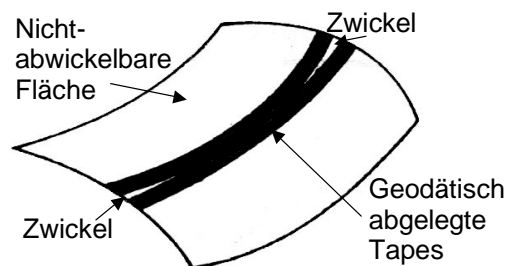


Bild 2.8: Auftreten eines Zwickels beim Belegen einer nicht-abwickelbaren Fläche [14]

Diese können nur durch entsprechenden Zuschnitt der Tapes geschlossen werden. Beim industriellen Einsatz des Duroplast-Tapelegens werden falls nicht anders möglich kleine Tapestücke zur Füllung der Zwickel per Hand eingelegt, was beim Thermoplast-Tapelegen nicht möglich ist [18]. Der Grad des Einflusses von nicht-abwickelbaren Flächen auf den Legepfad ist neben der Geometrie auch von der Drapierbarkeit des Tapes und der Tapebreite abhängig. Mit der Tapebreite steigt die Neigung zur Faltenbildung beim Legen von gekrümmten Bahnen (Bild 2.9). Die Grenzablegeradien sind unter anderem abhängig von Material, Faservolumengehalt und Tapedicke. Vice versa sind bei komplexeren Geometrien oder Legepfaden mit geringen Radien möglichst schmale Tapes zu benutzen [29].

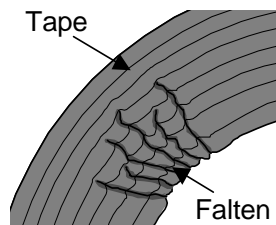


Bild 2.9: Faltenbildung durch Ablegen von gekrümmten Bahnen

Wichtig für gute Eigenschaften des Bauteils sind Vermeidung und Kontrolle von Lücken und Überlappungen (Bild 2.10) zwischen den Tapes. Sie entstehen durch ungenaue Prozessführung (z.B. Druck) oder Schwankungen der Halbzeugbreite.

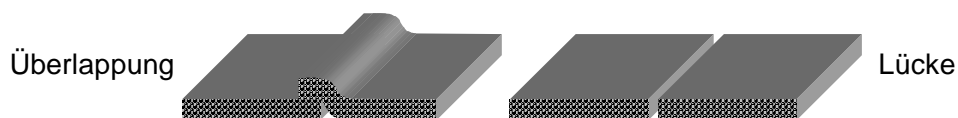


Bild 2.10: Überlappungen oder Lücken beim Ablegen der Tapes

Eine weitere Schwierigkeit für den Thermoplast-Tapelegeprozess besteht in der Fixierung der ersten Lage auf der Werkzeugplattform. Die thermoplastischen Tapes besitzen im Gegensatz zu duroplastischen Halbzeugen keine Eigenklebrigkeit (Tack), so dass sie beim Ablegen auf der Werkzeugoberfläche nicht durch einen primären Haftmechanismus anhaften. Insbesondere kommt es im Bereich konkaver Geometrien infolge mangelnder Adhäsionskräfte zum sog. Sekanteneffekt (Bild 2.11).

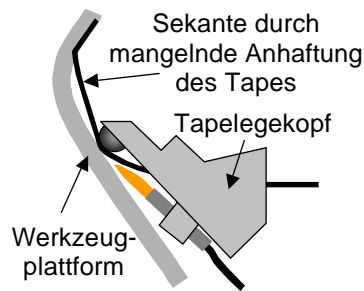


Bild 2.11: Sekanteneffekt in konkaven Konturen mangels Adhäsion

Die herstellbare Bauteilformkomplexität wird durch die Konstruktion des Verlegekopfes und die Prozessführung begrenzt. Die Tapes können nur abgelegt werden, wenn der Verlegekopf störungsfrei über die Werkzeugoberfläche unter Applizierung eines senkrechten Kompaktierungs- bzw. Konsolidierungsdrucks bewegt wird. Ausschlaggebend ist hier neben der Maschinenkinematik der Bauraum des Kopfes. Dies kann vor allem in konkaven Bereichen zu Einschränkungen führen. Beim Überfahren von konvexen Bereichen oder beim Durchfahren von konkaven Bereichen kann es beim Einsatz einer festen Konsolidierungsrolle zum Verkanten kommen (Bild 2.12).

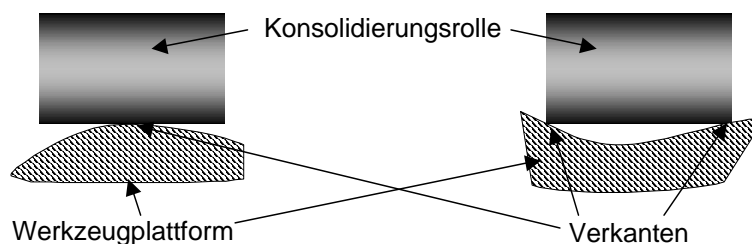


Bild 2.12: Verkanten der Kompaktierungs- oder Konsolidierungsrolle

Dadurch, dass das Laminat nur einseitig auf einer Werkzeugplattform anliegt, sind die Oberflächengüte und die Erfüllbarkeit von Toleranzanforderungen an Bauteilinnen- und -außenseite unterschiedlich.

Der Schneidmechanismus wird zur Herstellung eines Bauteils mehrere hundert- oder tausendmal aktiviert. Daher muss er nicht nur eine hohe Standzeit sondern auch hinsichtlich der erzeugten Materialtrennung eine hinreichende Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit aufweisen [11]. Der Schneidmechanismus muss an Prozessanforderungen wie Material, Tapequerschnitt und Schnittgeometrie angepasst werden, damit Zwickel besser ausgefüllt und ein Bauteil konturgenau hergestellt werden können.

Ein zusätzliches Problem stellt die Konsolidierung des Bahnanfangs und -endes dar. In beiden Fällen ist das Applizieren einer Fadenspannung schwierig. Obwohl der Ablegevorgang von der Konsolidierungsrolle dominiert wird, ist eine geringe Fadenspannung erforderlich, um ein Wellen oder unregelmäßige Ablegebreiten des Tapes zu vermeiden.

In Abhängigkeit vom eingesetzten Matrixwerkstoff können zusätzliche Probleme auftreten. Die Kunststoffwahl zwischen Duroplasten und Thermoplasten hat einen hohen Einfluss auf die Verarbeitung, Leistungsfähigkeit und Eigenschaften des Gesamtverbunds. Nachstehend sind die Vor- und Nachteile thermoplastischer und duroplastischer FKV zusammengefasst (Tabelle 2.2). Insbesondere die für die Verarbeitung relevanten Vor- oder Nachteile bedingen eine andere Prozessabfolge.

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile thermoplastischer und duroplastischer FKV [9, 30]

	Thermoplaste	Duroplaste
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Unbegrenzte, unklimateisierte Lagerfähigkeit • Schmelzbar, umformbar, schweißbar • Lösungsmittelfreie Verarbeitung • Hohe (Schlag-)Zähigkeit • Nahezu beliebige Prozessunterbrechung 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Viskosität • Gute Klebmöglichkeit • Gute Oberflächengüte • Hohe Verfügbarkeit • Geringe Kosten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Viskosität • Kriechneigung (bei höheren Temperaturen) • Hohe Verarbeitungstemperaturen • Hohe Verarbeitungsdrücke • Geringe Oberflächenhärte • Rauere Oberfläche • Meist höhere Halbzeugkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Verarbeitungszeiten • Begrenzte Lagerfähigkeit • Nicht schweißbar • Lösungsmitteldämpfe, flüchtige Bestandteile • Klimatisierung erforderlich

Die beim Duroplast-Tapelegen vorhandenen Probleme werden hier nicht weiter erörtert, sondern stattdessen auf [19, 20, 31] verwiesen. Der Thermoplast-Tapelegeprozess befindet sich im Vergleich zum Duroplast-Tapelegen noch in einer frühen Entwicklungsphase und wird in der Serienfertigung noch nicht eingesetzt. Die Tape-Halbzeuge sind daher mangels Nachfrage je nach Faser-/Matrix-Kombination schlecht verfügbar. Sie erschweren durch ihre Steifigkeit und Neigung zum Knicken die Handhabung. Die bisher mangelnde Prozessbeherrschung resultiert häufig in einer undefinierten Einstellung der Parameter Temperatur und Druck während des gesamten Prozesses, wodurch es zu starken Eigenspannungen in den Bauteilen kommt. Der Ablegeprozess ist in Folge der Online-Konsolidierung komplexer und erschwert die Herstellung von Laminaten ohne Lücken/Überlappungen. Durch die Applizierung des Konsolidierungsdrucks im schmelzflüssigen Zustand des Tapes

kommt es zu einer Erhöhung der Tapebreite und einer Reduzierung der Tapedicke (Bild 2.13).

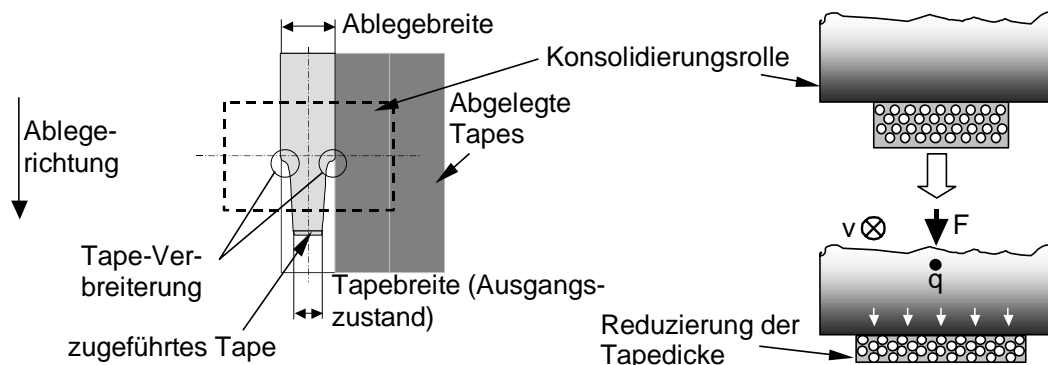


Bild 2.13: Geometrieänderung des Tapes bei der Ablage

Die Verarbeitungsfenster zur materialabhängigen Prozessführung sind noch nicht ausreichend festgelegt, und es existiert noch keine serientaugliche Prozesssteuerung sowie Qualitätssicherung. Zusammenfassend für die Eigenschaften des Tapelegens sind nachstehend in Tabelle 2.3 Vor- und Nachteile auf Basis des heutigen Stands der Technik dargestellt.

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile des Tapelegens nach dem heutigen Stand der Technik

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Automations- und Integrationsgrad • Alle Faser- und Matrixarten verarbeitbar • Integrationsmöglichkeit von Inlets/Sensorik • Herstellbare Bauteilgröße ab einer Untergrenze nach oben sehr variabel • Größe des Tapelegekopfs nicht proportional von herstellbarer Bauteilgröße abhängig • Herstellbare Bauteildicke sehr variabel • Sehr gute Erfüllbarkeit der Toleranzanforderungen um Bauteilkern/Bauteilinnenseite • Sehr gute Positioniergenauigkeit von Fasern • Sehr gute Beeinflussbarkeit der Faserorientierung während des Ablegens • Geringer Verschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Generierung der Ablegepfade • Schwierige Vorhersehbarkeit/Abschätzung von Prozesszeiten und -kosten • Nur begrenzte Bauteilformkomplexität • Eingeschränkte Erfüllbarkeit von Toleranzanforderungen an Bauteilaußenseite • Vergleichsweise hohe Zykluszeiten • In Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration hohe Anlagenkosten • Zum Teil hohe Materialkosten • Sensibler Prozess mit hohem Wartungsaufwand bzw. Fehlerwahrscheinlichkeit beim Duroplast-Tapelegen • Zum Teil bisher ungelöste Probleme beim Thermoplast-Tapelegen

Die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Duroplast- und Thermoplast-Tapelegen sind zur besseren Übersicht zusammenfassend in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Unterschiede zwischen dem Duroplast- und Thermoplast-Tapelegen

Merkmal	Duroplast-Tapelegen	Thermoplast-Tapelegen
Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none"> Geometrieadaptive Rolle durch Gummibeschichtung oder Segmentierung 	<ul style="list-style-type: none"> Integrierte Aufheizvorrichtung Geometrieadaptive Rolle durch segmentierten Andrückschuh
Halbzeuge	<ul style="list-style-type: none"> Faserbündel/Tow/Tape mit Schutzfolie Temperierung der Halbzeuge in Lager, Spulenschrank und Kopf 	<ul style="list-style-type: none"> In der Regel Tape
Aufbringen der ersten Lage	<ul style="list-style-type: none"> Aufbringen eines Tackifiers 	<ul style="list-style-type: none"> Bisher Unterdruck, Verkleben (nicht großserientauglich gelöst)
Ablegen und Konsolidierung	<ul style="list-style-type: none"> Leichtes Erwärmen zur Erhöhung der Eigenklebrigkeit Andrücken/Kompaktierung Konsolidierung im Autoklav 	<ul style="list-style-type: none"> Aufschmelzen des Tapes Online-Konsolidierung mit dem Laminat durch Applizierung des Konsolidierungsdrucks

2.5 Stand der Technik der Thermoplast-Tapelegeanlagen

Die zumeist an Forschungsinstituten durchgeführten Entwicklungsarbeiten führten bisher zu mehreren unterschiedlichen Tapelegeköpfen zur Verarbeitung von thermoplastischen, faserverstärkten Tapes. Allerdings bauen einige Entwicklungen konstruktiv auf fremdentwickelten TLK auf (Sekundärentwicklung).

Unabhängig von der Tapebreite und der Anwendung werden bei der Thermoplast-Verarbeitung immer unidirektional endlosfaserverstärkte, vollständig imprägnierte und konsolidierte Tapes verwendet. Im Vergleich zu früher diskutierten Alternativen [30] erfolgt die Herstellung der Tapes fast ausschließlich durch Pulver- oder Schmelzeimprägnierung. Die Tapes werden wie bei den duroplastischen Halbzeugen auf Spulen geliefert und haben eine Dicke von 0,12 – 1 mm bzw. eine Breite von 5 – 300 mm. In der Regel besitzen die Tapes zwischen 30 und 70 Faservolumenprozent (Fvol%). Eine Auswahl der zur Zeit erhältlichen Thermoplast-Tapes und einige ihrer Kennwerte sind in Tabelle 2.5 aufgelistet.

Tabelle 2.5: Auswahl verfügbarer Thermoplast-Tapes [32, 33, 34, 35, 36]

Hersteller	Faser	Matrix	Fvol% [%]	Faserflächengewicht [g/m ²]	Tg [°C]	Max. Einsatztemp. [°C]	Konsolidierte Dicke [mm]	Breite [mm]	Zugfestigkeit [MPa]
Cytec Fib.	CF	PEEK	61	133	143	250	0,132	6,1	2.048
Flex Co.	GF	PP	36	k.A.	-10	80	0,4	14	k.A.
Gurit Sup.	CF	HDPE	40	182	-40	60	0,253	12*	1.100
Gurit Sup.	CF	PA12	50	133	60	90	0,148	12*	2.200
Gurit Sup.	CF	PVDF	40	133	-40	130	0,148	12*	1.400
Gurit Sup.	CF	PEEK	60	133	144	250	0,125	12*	2.100
Tow Flex	CF	PPS	53	237	88	200	k.A.	k.A.	k.A.

*) Standardbreiten erhältlich von: 6, 12, 24, 48, 150 mm

2.5.1 Automated Dynamics Ltd. (ADC)

Die Thermoplast-Tapelegeanlage von ADC wird zur Zeit als einzige gewerblich vertrieben. Verschiedene Firmen haben sich dies zu nutze gemacht, um auf diesem TLK eine eigene Entwicklungsstufe aufzubauen [37]. Nachstehend sind die wesentlichen Spezifikationen aufgeführt.

- Portalanlage oder ein 6-Achs-Knickarmroboter [38]
- Bauteilgrößen von 6,1 m x 1,2 m (Portal) [39]
- 1 Tape mit 25,4 mm oder 5 Tapes mit 6,1 mm Breite
- patentierter Stickstoff-Heißgas-Brenner (Gewicht: 250 g)
- Heißgas: 1000 °C bei 1,5 kW bei einem Verbrauch von 47 Liter N₂/min [40]
- Schneideinheit pneumatisch, Vorschubmechanismus mit Elektromotor
- Infrarot-Pyrometer, Sensor für Andrückkraft, Windows-basierte Software [41].

Neuester Stand ist ein Tapelegekopf, der ein einzelnes 25,4 mm breites Tape ablegen kann (Bild 2.14) [42]. Alternativ wird auf dieser Anlagenkonfiguration auch die neueste Version des Multi-Tapelegekopfes mit 5 Tapes eingesetzt [43]. Die Anlage kommt bisher zur Fertigung verschiedener Demonstratorbauteilen zum Einsatz [44].

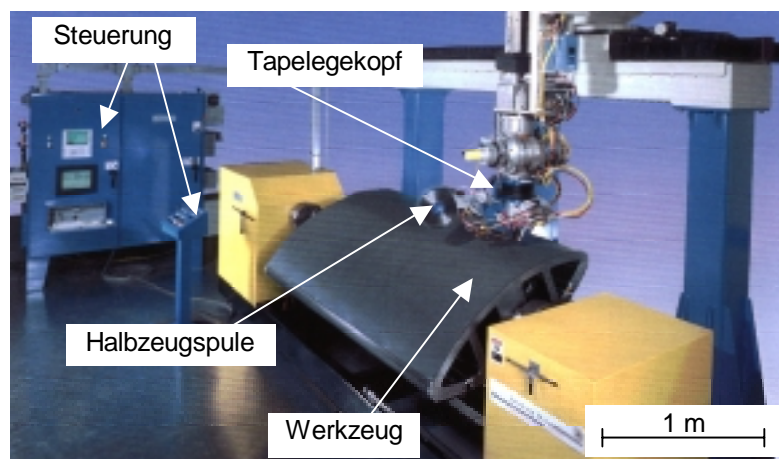


Bild 2.14: Neue Tapelegeanlage von Automated Dynamics [45]

2.5.2 ABB Corporate Research

Zum Einsatz kommt der ADC TLK in Verbindung mit einem hauseigenen IRB 6400 6-Achs-Knickarm-Roboter (Bild 2.15) [46]. Bisher kommt die nachstehend vorgestellte Anlage vornehmlich für das Wickeln zum Einsatz [47]:

- Knickarmroboter (Wiederholgenauigkeit: 0,1 mm, Nutzlast: 200 kg) [48]
- Stickstoff-Heißgas-Brenner, Infrarot oder Nd:YAG-Laser
- bisher maximale Ablegegeschwindigkeiten von 5 m/min
- Infrarot-Pyrometer gleichzeitig an 4 Stellen zur Temperaturregelung
- Steuerung der Laserleistung über ein neuronales Netzwerk-Modell
- Regelung von Gasmengenstrom, Andrückkraft, Fadenspannung, TLK-Position
- LabView-Benutzeroberfläche [49].

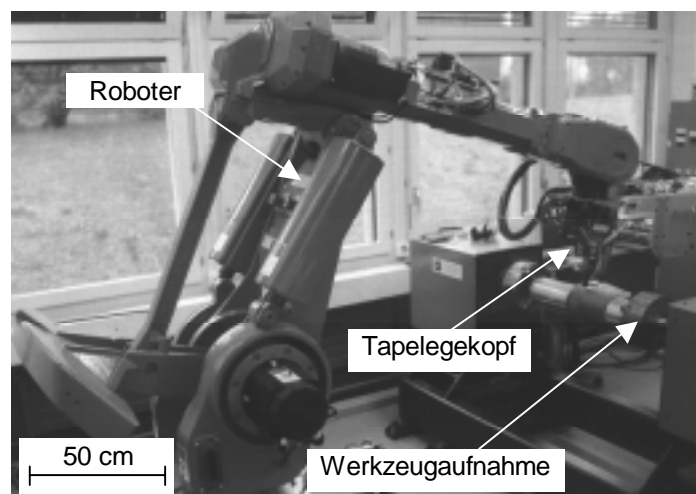


Bild 2.15: Tapelegeanlage von ABB [49]

2.5.3 EADS – CRC

EADS – CRC (früher: Dassault Aviation/Aerospace) nutzt ebenfalls den TLK von ADC zur Verarbeitung von CF/PEEK und CF/PEI. Der TLK wurde dazu in der Vergangenheit hängend an ein Portalsystem montiert. Hier wurden im Rahmen eines Hybridverfahrens bereits erste Demonstratorbauteile (Flugzeug-Rumpfteil) hergestellt. Im Tapelegeverfahren wurden zunächst vorkonsolidierte Bleche hergestellt, die anschließend mittels Pressen umgeformt und endkonsolidiert wurden. Zusätzliche Verstärkungsrippen werden dann mittels Diffusionsschweißen angefügt [37].

Zur Zeit ist bei EADS – CRC eine neue Anlage mit einem TLK für 25,4 mm breite Tapes von ADC zur Herstellung einer Flügelnase in Betrieb (Bild 2.16). Interessant an dem Fertigungskonzept ist, dass zuvor in das Werkzeug eingelegte Stringer beim Herstellen der äußeren Schalenstruktur direkt mit dieser verschweißt werden [50]. Im

Wickelverfahren werden zwei Flügelnasen gleichzeitig hergestellt und anschließend durch Sägen getrennt.

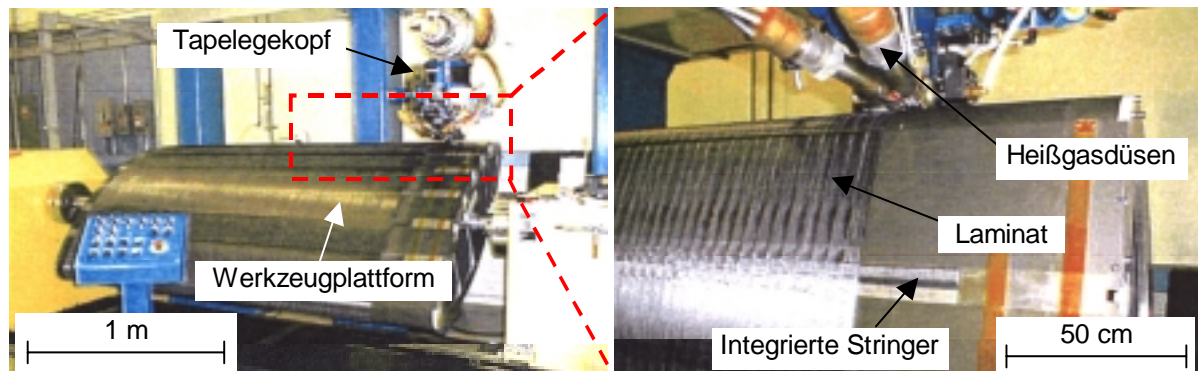


Bild 2.16: Neue ADC Tapelegeanlage bei EADS – CRC [45]

2.5.4 NASA – Langley Research Center

Das NASA-LARC Forschungszentrum in Langley arbeitet gegenwärtig an der Weiterentwicklung des ADC Tapelegekopfes. Wie in Bild 2.17 zu erkennen ist, wird der TLK mit 5 Tapes ebenfalls mit Hilfe eines 6-Achs-Knickarm-Roboters benutzt.

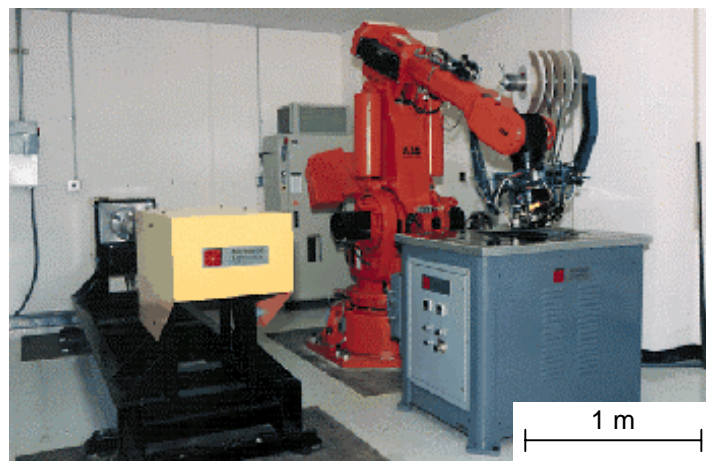


Bild 2.17: Tapelegeanlage des NASA-LARC [51]

Es können sowohl rotationssymmetrische Bauteile auf einer Spindel (im Bild links) oder Platten auf einem beheizbaren, ebenen Unterwerkzeug (im Bild rechts) gefertigt werden. Das komplette System einschließlich Steuerung und Software wurde von ADC entwickelt. Eigene Arbeiten des NASA-LARC beschäftigen sich gegenwärtig mit den Themen: Ansetzen von Tapes auf dem Bauteil („start-on-the-part“), Modellierung

der Thermodynamik, Grenzablegeradius, Anforderungen der Autohäsion, Entwicklung von Sensoren zur online Messung von Qualitätsparametern und der Kostenreduktion [38, 52]. Das Unterwerkzeug zum Ablegen ebener Platten kann während des Prozesses auf bis zu 204 °C (400 °F) erhitzt werden, um Eigenspannungen im abgelegten Laminat zu vermeiden. Auf dem Werkzeug befindet sich zur thermischen Isolation eine 3 mm dicke Bakelitschicht. Auf diese werden als Startlage 30 cm breite CF/PEEK Prepregs aufgelegt [53]. Zur Fixierung der ersten Lage wird das Werkzeug mit Unterdruck beaufschlagt und die Tapes auf die Oberfläche gesaugt. Die höchsten Werte (18,4 N/cm) für die interlaminare Festigkeit ergaben die Parameter: 800 °C Heißgas-Temperatur, 410 °C Andrückrollen-Temperatur, 467 N Andrückkraft bei 1,5 m/min Legegeschwindigkeit. Zusätzlich wird ein thermodynamisches Modell zur Abschätzung und Optimierung der In-situ-Konsolidierung entwickelt [54, 55, 56]. Dennoch sind bisher keine Serienbauteile hergestellt oder die Erstlagenproblematik gelöst worden.

2.5.5 Center for Composite Materials (CCM), Universität Delaware

Bisher wurden zwei TLK entwickelt deren Eigenschaften ausführlich von STEINER beschrieben wurden [11]. In einer zweiten Entwicklungsstufe sind die wesentlichen Elemente beibehalten und weiterentwickelt (Bild 2.18a und b):

- 6-Achs-Knickarmroboter (Arbeitsradius: 1,25 m, Wiederholgenauigkeit: 0,2 mm)
- 21 kg schwerer TLK mit 380 m Tapespule
- elektromagnetische Bremse für Tapekräfte von 5 bis 200 N
- Variation der Konsolidierungskraft zwischen 0 und 350 N
- zwei Stickstoff-Heißgasdüsen (ADC) mit je 1,1 kW für max. 1000 °C
- jeweils eine Rolle zur Vorkompaktierung und Konsolidierung
- Schneidpuffer mittels Schwenkarm.

Mit diesem TLK werden CF/PEEK Tapes mit Geschwindigkeiten von 0,06 bis 1,2 m/min verarbeitet. Das System ist bereits mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet. So werden an vier Stellen ($T_1 - T_4$ in Bild 2.18a) die Temperaturen über luftgekühlte Infrarot-Pyrometer erfasst. Da die Brennerdüsen hohe Reaktionszeiten besitzen, erfolgt deren Steuerung über die Düsenhöhe. Zugleich wird der Gasdurchfluss gemessen. Er beträgt etwa 50 l N₂/min. Zur genaueren Steuerung der Temperatur wird ein

computergestütztes Modell auf Basis eines neuronalen Netzwerks verwendet [57, 58, 59]. Darüber hinaus existieren umfangreiche Arbeiten zu den Verbindungsmechanismen während des Ablegeprozesses [60, 61, 62].

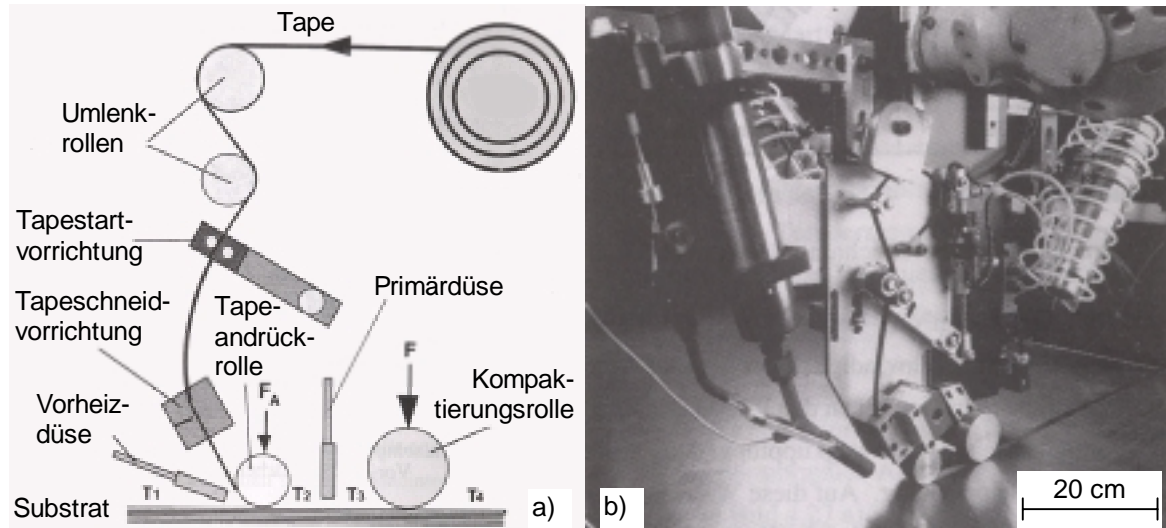


Bild 2.18: Schematik (a) und Bild (b) des Tapelegekopfes des CCM [11]

2.5.6 Cincinnati Machine

Cincinnati Machine ist Weltmarktführer für Tapelegetechnik. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, bietet die Firma serienreife Anlagen zur Verarbeitung von duroplastischen Tapes kommerziell an. Mitte der 80er Jahre wurde auch ein Thermoplast-Tapelegekopf entwickelt. Weitere Arbeiten sind nicht bekannt.

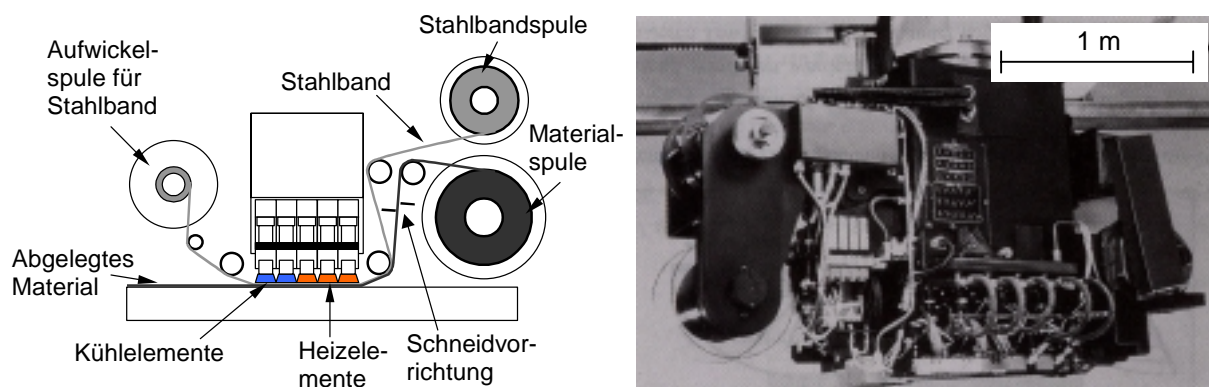


Bild 2.19: Prinzip a) und Bild b) des Thermoplast-Tapelegekopfes von Cincinnati Machine [63]

Der in Bild 2.19 dargestellte TLK ist hängend an einer Portalachsenanlage mit einer rotatorischen und drei translatorischen Achsen montiert. Wesentliche Funktionsein-

heiten sind fünf Andrückelemente, die ähnlich einer Doppelbandpresse funktionieren. Die ersten drei auf der Seite des einlaufenden Tapes sind Heizelemente und erwärmen das Tape und das Laminat bis über Schmelztemperatur. Nachfolgend sorgen zwei Kühlelemente für die Abkühlung und Konsolidierung. Die Heiz- und Kühlzone unter den Elementen ist dabei durchgehend mit Druck beaufschlagt. Zur Reduzierung der Reibung zwischen Thermoplast-Tape und Konsolidierungselementen wird als Transportsystem ein Stahlband eingesetzt. Es wird von einer Spule abgezogen und hinter der Schneideinheit mit dem Thermoplast-Tape zusammengeführt, wodurch sich die An- und Absetzproblematik deutlich reduziert. Hinter der Kühlzone trennen sich Stahl- und Thermoplast-Tape wieder. Gegenwärtig wird diese Technologie erneut von der Firma Accudyne Systems Inc. aufgegriffen [64, 65]. Nachteile dieses Prozesses sind, dass nur ebene oder sehr leicht gekrümmte Oberflächen herstellbar sind und die Einsetzbarkeit aufgrund des extrem großen Bauraums eingeschränkt ist.

2.5.7 Institut für Produktionstechnologie (IPT)

Am IPT in Aachen wurden bisher zwei TLK entwickelt. Die erste Entwicklungsstufe wurde 1994 detailliert von SCHMIDT u.a. vorgestellt [66, 67, 68]. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 332 wurde eine zweite Entwicklungsstufe des Thermoplast-TLK entwickelt (Bild 2.20):

- Portalanlage
- gleichzeitiges Ablegen von 5 Tapes á 6,1 mm Breite
- paarweiser Transport und Schneiden mit drei Messern und Vorschubantrieben
- Aufheizquellen: 1,6 kW Nd:YAG mit Laserscanner [69, 71] mit Wirkungsgrad von 4 % oder 680 W Diodenlaser mit einem Wirkungsgrad von 28 – 33 % [70].

Erste Lösungskonzepte für eine Geometrie-adaptive Andrückvorrichtung in Form einer segmentierten Andrückrolle aus Lamellen wurden vorgestellt. Während eine Variante als feststehender Andrückschuh ausgelegt ist, erlaubt eine zweite ein Mitdrehen der Segmente. Das feststehende System gestattet durch eine Druckblase zwar eine leichtere und stärkere Anpassung des Andrucksystems an Oberflächenunebenheiten, jedoch erzeugt es eine hohe Reibung auf der Laminatoberfläche. Durch das

mitdrehende System wird die Reibung reduziert. Allerdings ist die Adaptivität der Rolle durch die verwendeten Biegeachsen eingeschränkt.

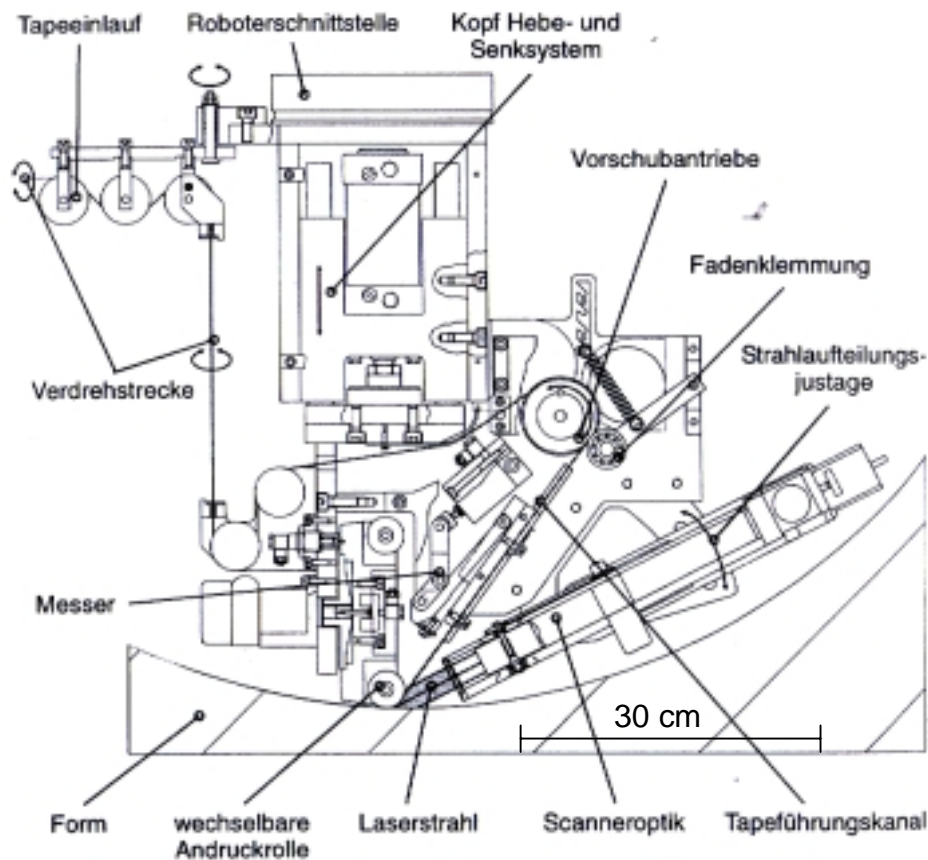


Bild 2.20: Thermoplasttapedegesystem [71]

Bild 2.21 zeigt Variante 3, bestehend aus mehreren Stahlscheiben, die mit Kühlbohrungen versehen und auf einem Zylinder aus Siliconharz fixiert sind. Der Zylinder sitzt auf einer Gleitlagerhülse. Seitlich wird sternförmig Kühlluft in die Verteilerkanäle eingeleitet.

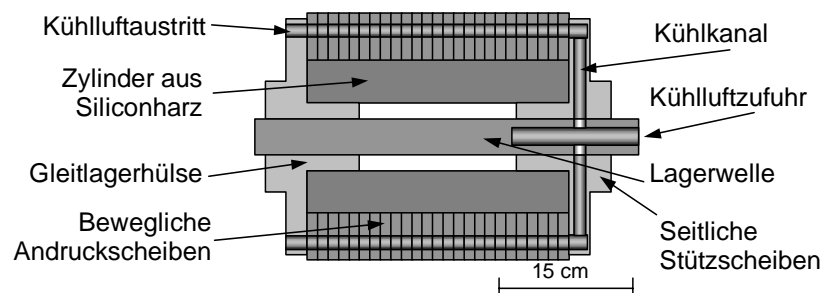


Bild 2.21: Lösungsvorschlag für ein geometrieadaptives Andrucksystem [70]

Obwohl diese Variante am geeignetsten ist, bestehen noch einige Defizite:

- keine Anpassung an konkave Geometrien,
- Aufsetzen der seitlichen Stützscheiben beim schrägen Durchfahren von Kanten,
- Kühlmöglichkeit ist unzureichend bzw. Temperierung kaum möglich,
- treppenförmiger Abdruck im Laminat auf nicht ebenen Oberflächen.

Neben dem nichtgelösten Erstlagenproblem besteht das Defizit, dass die vorgestellte Konstruktion aufgrund des Aufheizverfahrens einen sehr großen Bauraum besitzt, was insbesondere die Fertigung von konkaven Oberflächen erschwert.

2.5.8 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW)

Ausgangssituation dieser Arbeit ist der in Bild 2.22 dargestellte TLK des IVW, der die folgende Spezifikationen besitzt:

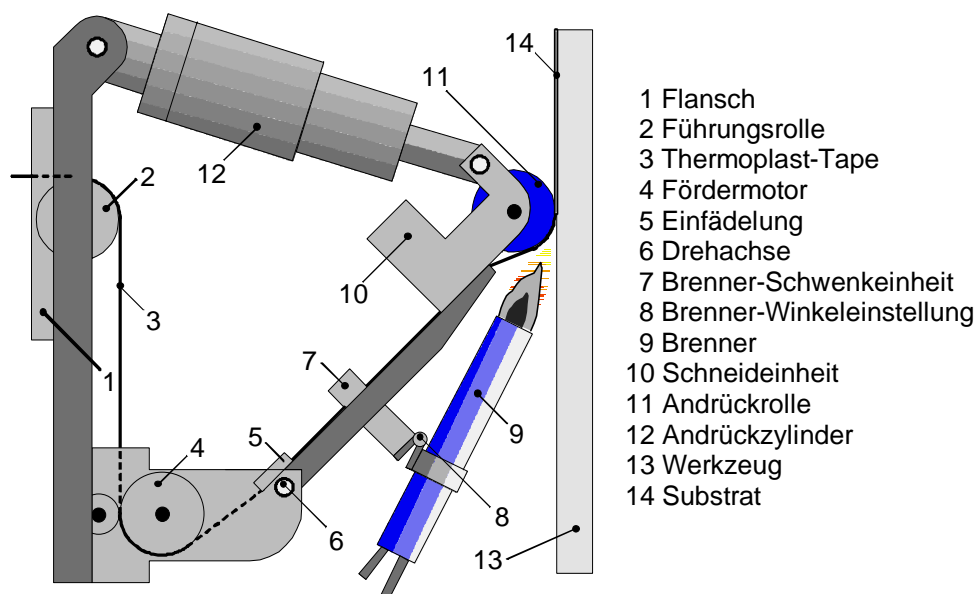


Bild 2.22: Tapelegekopf des IVW

- 6-Achs-Portalanlage (Arbeitsfläche von 1,5 m mal 4 m)
- Aufheizquelle: H_2/O_2 -Flamme (Gasdruck über Potentiometer geregelt)
- Brenner ist auf einer Halterung in Abstand und Winkel manuell verstellbar sowie pneumatisch ein- und ausschwenkbar
- Pneumatisches Vorschub-, Andrück- und Schneidsystem (Schlagmesser)

- Untemperierte Konsolidierungsrolle
- IR-Pyrometer zur Messung der Laminat- oder Rollentemperatur
- Messeinrichtung für Temperatur, Tapegeschwindigkeit und -spannung.

Bisher wurden mit diesem TLK hauptsächlich kohlenstofffaserverstärktes PPS und PEEK mit bis zu 10 m/min verarbeitet. Erste Versuche erfolgten auf einer vertikal befestigten Stahlplatte mit Trägermaterial. Die Konsolidierungskraft liegt zwischen 90 und 330 N bei einer Rollenbreite von 15 mm. Bisherige Defizite der Anlage sind:

- Unzuverlässiger Vorschub- und Andrückmechanismus
- Leichte Schwingungen aufgrund zu geringer Steifigkeit des TLK
- Keine elektrische An-/Ausfunktion der Flamme
- Erstlagenproblem nicht gelöst
- Unzureichende Messdatenerfassung und Prozesssteuerung.

Die vorgestellten Verfahren ermöglichen demnach erste Ablegeversuche. Eine für den Prozess geeignete Robotik und erste Entwicklungsstufen von Tapelegeköpfen stehen zur Verfügung. Die Messdatenerfassung und die Prozesssteuerung sind nur teilweise in den Prozess integriert bzw. serientauglich. Zusätzlich blieben bisher eine Reihe von Anforderungen wie die Lösung des Erstlagenproblems unberücksichtigt. Somit besteht auch für die Anlagentechnik ein Entwicklungsbedarf für unterschiedliche Problemgebiete, die in dieser Arbeit aufgegriffen werden sollen.

3 Analyse des Thermoplast-Tapelegeprozesses

3.1 Strategische Prozessanalyse

Im Rahmen einer strategischen Prozessanalyse sollen potenzielle Produkte und Absatzmärkte des Tapelegeverfahrens identifiziert werden. Betrachtet man den Tapelegeprozess als produktionswirtschaftliches System, liegt hier die Aufgabe der langfristigen Produktionsprogrammgestaltung vor. Normalerweise werden dabei strategische Produktfelder festgelegt und die Produktion entsprechender Produkte eingeleitet. Hier ist das Tapelegeverfahren bereits Resultat einer Programmanalyse zur Herstellung sehr großer Bauteile aus FKV [6]. Ähnlich wie bei anderen Herstellungsverfahren für FKV erfolgt die Marktdurchdringung sehr langsam. An dieser Stelle sollen weitere Produkte und schließlich Märkte herausgearbeitet werden, um das Verfahren auf einem größeren Markt anzubieten bzw. die Vorteile und Eigenschaften besser herauszustellen. Ein wichtiges Instrument für diese Aufgabe ist die Portfoliomethode [72]. Dazu wurden Schlüsselfaktoren der FKV-Verarbeitungsverfahren identifiziert und aussagekräftig in Portfolios gegenübergestellt [73].

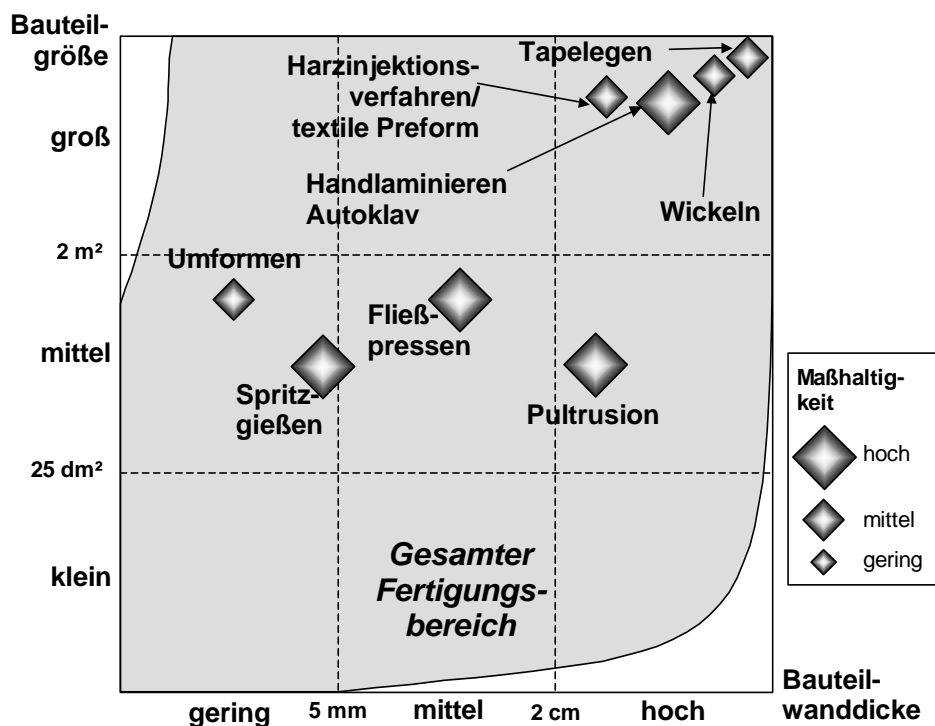


Bild 3.1: Portfolio zu Bauteildimensionen

Das erste Portfolio (Bild 3.1) zeigt herstellbare Bauteildimensionen der Verfahren auf. Die einzelnen Verfahren sind nach ihrer maximal herstellbaren Bauteilgröße und -wanddicke unterschieden. Eine Differenzierung von duroplastischem und thermoplastischem Wickeln bzw. Tapelegen ist nicht erforderlich. Unter Berücksichtigung der minimalen Bauteilgröße und -wanddicke lässt sich zusätzlich der Fertigungsbe-
reich aller Verfahren einzeichnen. Weiterhin kennzeichnet die Rautengröße die Maßhaltigkeit der Verfahren bei der Fertigung. Danach sind mit der Wickeltechnik und Tapelegetechnik die Bauteile mit den größten Flächen und Wanddicken herstellbar. Jedoch sind die minimale Bauteilgröße und insbesondere die realisierbare Maßhaltigkeit beschränkt.

In dem zweiten Portfolio zum Bauteilspektrum (Bild 3.2) sind alle Verarbeitungsverfahren nach herstellbarer Bauteilgröße und -formkomplexität eingetragen. Kriterien, die die Formkomplexität von Bauteilen beschreiben, sind z.B.: Grad und Anzahl von Hinterschneidungen, flächenbezogener Grad und Anzahl der Form- und Dickenänderungen. Es ist davon auszugehen, dass die Komplexität eines Bauteils nur kontextspezifisch quantifizierbar ist. Dieses Thema wird detailliert in Kapitel 5.2 diskutiert.

Für das Portfolio sind aufgrund des Parameters Bauteilformkomplexität Kontur- und Multi-Tapelegen gesondert zu betrachten. Das verfahrensspezifische Intervall herstellbarer Bauteile ist jeweils durch eine Linie (Bauteilgröße) und einem grauen Balken (Bauteilformkomplexität) gekennzeichnet. Die Größe der Raute in dem Portfolio kennzeichnet den maximalen Grad der Faserpositionierung/-orientierung durch das Fertigungsverfahren. Dabei entsprechen:

- Hoch: Variable Positionierung; endlosfaserverstärkt; definierte Faserwinkel; Radian möglich.
- Mittel: lagenweiser Aufbau; endlosfaserverstärkt; definierte Faserwinkel.
- Niedrig: Lang- oder Kurzfaserverstärkung; ungeordnete Fasern.

Zusätzlich sind in das Portfolio mögliche Bauteilklassen eingezeichnet, um eine Zuordnung von Verfahren zu Bauteilen zu ermöglichen.

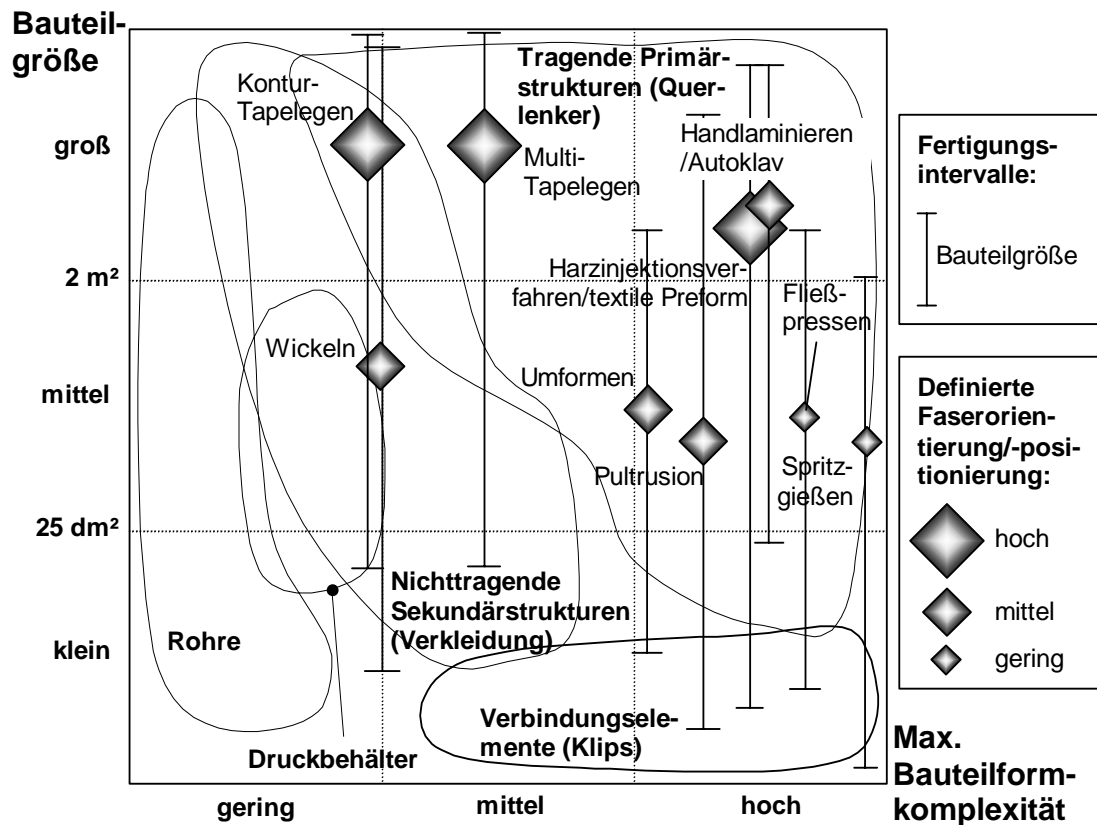


Bild 3.2: Portfolio zum Bauteilspektrum

Demnach decken die FKV-Verarbeitungsverfahren nahezu die komplette Portfoliofläche ab. Nur sehr große und extrem komplexe Bauteile können nicht als Einzelteil gefertigt werden. Kleine bis sehr kleine Teile (z.B. Klipse oder Stecker) können wiederum nur durch Spritzgießen hergestellt werden. Die übrigen Verarbeitungsverfahren grenzen sich vorrangig durch die verarbeitbare Bauteilformkomplexität und Möglichkeit definierter Faserorientierung und -positionierung ab. Für rotationssymmetrische Geometrien und Druckbehälter bietet sich besonders das Wickelverfahren an. Das Pultrusionsverfahren kommt nur für Profile in Frage. Für nichttragende Sekundärstrukturen eignen sich die Umformtechnik, die Tapelegeverfahren, Handlaminieren/Autoklaventechnik und die Harzinjektionsverfahren in Verbindung mit der Preformtechnik. Für tragende Primärstrukturen kommen überwiegend höher beanspruchte, komplexe Bauteile zum Einsatz, so dass sich für diese Anwendungen vorzugsweise Harzinjektionsverfahren, Autoklav- und Umformtechnik sowie je nach Beanspruchung aber auch Spritzgießen und Fließpressen eignen. Denkbar für diese Anwendungen wären auch die bisher

noch nicht eingesetzten Tapelegeverfahren, die auch als Hybridverfahren in Kombination mit dem Umformverfahren Potenziale zeigen (siehe Kapitel 6).

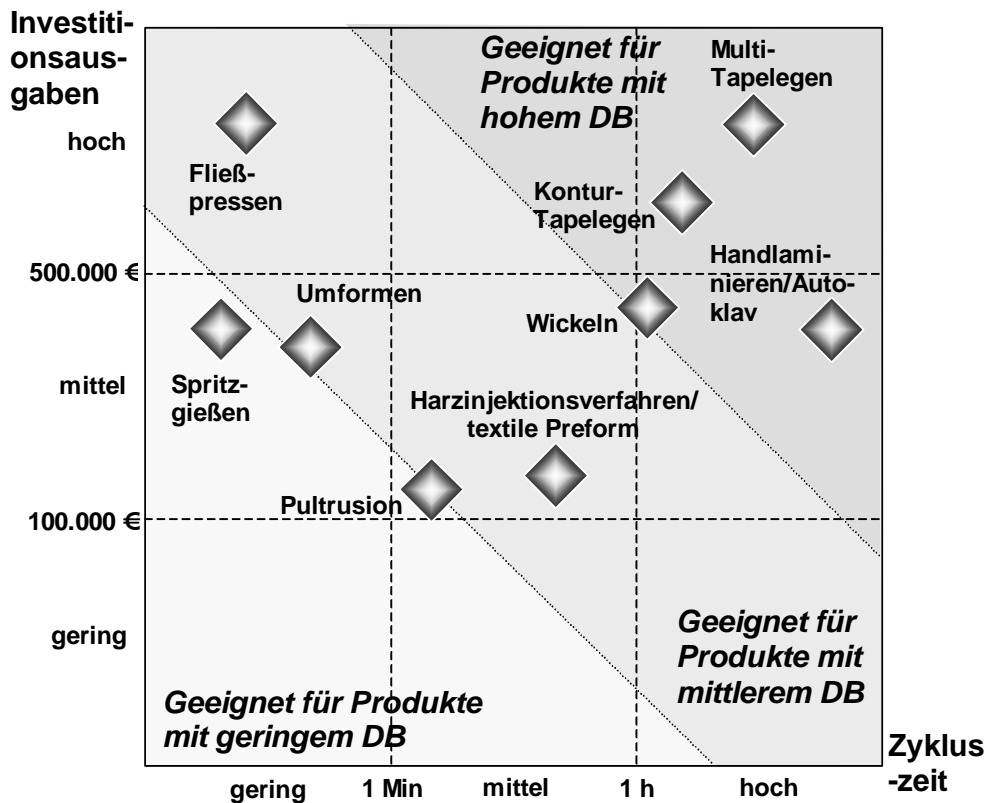


Bild 3.3: Portfolio zur betriebswirtschaftlichen Einsetzbarkeit

Das dritte Portfolio analysiert die Verfahren hinsichtlich ihrer betriebswirtschaftlichen Einsetzbarkeit für Produkte. Die Verfahren sind hier gemäß der Investitionsausgaben und der verfahrensüblichen Zykluszeit grob eingetragen. Mit steigender Investition und Zykluszeit steigen auch tendenziell die stückbezogenen Fixkosten, so dass sich im Umkehrschluss auch die Forderung an die Höhe des Deckungsbeitrags (DB) eines mit diesem Verfahren gefertigten Produkts erhöht. Das Portfolio kann hier nur eine qualitative Tendenz wiedergeben, da Investitionskosten und Zykluszeiten stets von der Bauteilgröße, -stückzahl und -komplexität abhängen. Die Bereiche unterschiedlicher Deckungsbeitrags-Anforderungen sind ebenfalls in das Portfolio eingetragen (Bild 3.3). Wie zu erkennen ist, befinden sich nahezu alle Verfahren in den Bereichen mit mittlerer bis hoher Deckungsbeitragsanforderung. Insbesondere die Tapelegeverfahren besitzen hohe Investitionskosten und vergleichsweise hohe Zykluszeiten, was vor allem auf die in der Regel hohe Bauteilgröße zurückzuführen

ist. Folglich müssen Produkte anvisiert werden, die durch ihren Marktwert einen hohen Deckungsbeitrag bieten. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Tapelegeverfahren können weitere Verfahrensoptimierungen (z.B. geringere Totzeiten) die Zykluszeit reduzieren.

Auf Basis der Portfolios und Vor- und Nachteile (Tabelle 2.3) lassen sich prinzipielle Verfahrenseigenschaften und davon die Eigenschaften von Bauteilen, Produkten und schließlich die zugehörigen Märkte ableiten (Bild 3.4).

Verfahrenseigenschaften	Bauteileigenschaften	Potenzielle Produkte	Potenzielle Märkte
<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitung aller Faser-Matrix-Kombinationen • Sehr große Flächen herstellbar • Max. mittlere Bauteilformkomplexität • Dickenvariation sehr variabel • Beliebige Faserorientierung • Beliebige Faserpositionierung • Hohe Material- und Investitionskosten • Hohe Zykluszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gute mechanische und chemische Eigenschaften • Sehr großflächig mit leichten Krümmungen • Variable Dicken mit Stufungen • Leichtbau mit sehr beanspruchungsgerechter Auslegung • Teile im Hochpreissegment • Geringe Stückzahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Tragflächen • Rumpfteile • Rotorblätter • Turm • Gehäuse • Tailored Blanks • Karosserieteile • Außenverschalung • Bootsrümpfe • Verschalung • Auftriebsbehälter • Schussichere Beplankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Luft- & Raumfahrt • Windkraftwerksbau • Automobilbau • Eisenbahnbau • Schiffsbau • Brücken-/Tunnelbau • Off-shore • Militär

Bild 3.4: Ableitung potenzieller Produkte und Märkte für das Tapelegen

Wie diese Untersuchung gezeigt hat, eröffnen sich über die detaillierte Analyse eine Vielzahl potenzieller Produkte und Märkte für das Thermoplast-Tapelegeverfahren. Im Umkehrschluss lassen sich aus diesen Potenzialen Verfahrensanforderungen wie hohe Prozessflexibilität und -genauigkeit sowie eine Steigerung der Zykluszeit für zukünftige Entwicklungsarbeiten ableiten.

3.2 Operative Prozessanalyse

Die wichtigsten Elemente der operativen Prozessanalyse sind die Prozessidentifikation/-abgrenzung, die Erfassung der Prozesslogik und die Ermittlung aller Prozesspa-

parameter sowie deren Interdependenz. Unter einem Prozess versteht man „Tätigkeits-, Aktivitäts- und Handlungs- oder Aufgabenfolgen, die in einem logischen Zusammenhang stehen und durch einen Prozessbeginn (Trigger) und ein Prozessende abgrenzbar sind. [...] Ziel der Prozesslogik ist es, auf der Grundlage der Input-Transformations-Outputanalyse der einzelnen Aktivitäten und Subprozesse die Verflechtung untereinander zu analysieren und zu dokumentieren“ [74]. An anderer Stelle ist ein Prozess definiert als „die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird [...]“ [75].

Die Ergebnisse einer vollständigen Analyse, Beschreibung und schließlich Visualisierung des Tapelegeprozesses ermöglichen neben dem umfassenden Prozessverständnis eine Prozessoptimierung und die Entwicklung eines Steuerungsansatzes. Zur Identifikation und Visualisierung des Prozesses und seiner Einflussgrößen dient die Systemtechnik. Sie erlaubt es, ein System aus verschiedenen Sichten zu analysieren [76]. Insbesondere die Bildung von Modellen gehört zu den klassischen Instrumenten der Systemtechnik [77, 78].

Ein System kann beschrieben werden als eine Menge von zueinander in Beziehung stehender Elemente. Das sich über die Verbindungen der einzelnen Elemente ergebende Gebilde stellt die Struktur bzw. die Komplexität eines Systems und auch sein Verhalten dar. Die Abbildung komplexer Systeme erfordert geeignete Modellierungsmethoden. Einerseits soll das Modell die Eigenschaften, Strukturen und Beziehungen des zugrunde liegenden Systems aufzeigen, andererseits muss das Modell für die konkrete Zielsetzung Aussagen zulassen [79]. Die Thermoplast-Tapelegetechnik ist in Anwendung von [80] ein technisches System (TS).

Zur Auswahl einer entsprechenden Modellierungsmethodik für den Thermoplast-Tapelegeprozess werden zwei Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit untersucht. Bei der ersten Methodik handelt es sich um die von HUBKA aufgestellte Theorie zum methodischen Konstruieren [81]. Aus dem Fertigungs- oder Transformationsprozess werden bei HUBKA mit Hilfe der Black-Box Anforderungen an das zu konstruierende technische System abgeleitet. Es wird folglich der Frage nachgegangen, wie die Auswirkungen auf den Operanden (das Element der Veränderung) erzielt werden können, um den angestrebten Endzustand zu erreichen. Die Einwirkungen der Operatoren (die Organe, die die Veränderung bewirken) Mensch, Umgebung

und TS werden dabei in stoffliche, materielle und energetische Einwirkung differenziert. Aufbauend auf diesen grundsätzlichen Überlegungen, wird das ‚Innere‘ des technischen Systems zunehmend verfeinert, indem die Modelltypen Anforderungsmodell, Funktionsstruktur, Organstruktur und Baustruktur durchlaufen werden. Für die Analyse und Beschreibung des Thermoplast-Tapelegeprozesses steht die Organstruktur im Vordergrund, da ein Grobkonzept inkl. der Funktionsstruktur existiert. Zur Visualisierung der Prozesselemente existieren bei Hubka keinerlei Hinweise.

Die Structured Analysis and Design Technique (SADT) ist eine besonders in der Luftfahrtindustrie verbreitete Methode [79]. Sie wurde 1977 von ROSS als grafisches Beschreibungsmittel für komplexe Systeme unterschiedlicher Art entwickelt. Die Methode beinhaltet ein Aktivitätsmodell und ein Datenmodell [82]. Im Aktivitäten- bzw. Datenmodell werden zur Darstellung von Aktivitäten oder Daten Rechtecke verwendet. Diesen werden Eingabe-/Ausgabedaten zugeordnet, die um Daten zur Steuerung und Mechanismen zur Unterstützung erweitert werden. Die im Aktivitätenmodell spezifizierten Aktivitäten erscheinen dabei im Datenmodell als horizontale Pfeile. Bei der Abbildung der Abläufe findet keine Unterscheidung der verschiedenen Arten von Relationen (materiell, energetisch, informationell) statt. Ebenso wenig sind die ausführenden Ressourcen bzw. Operatoren Gegenstand der Beschreibung.

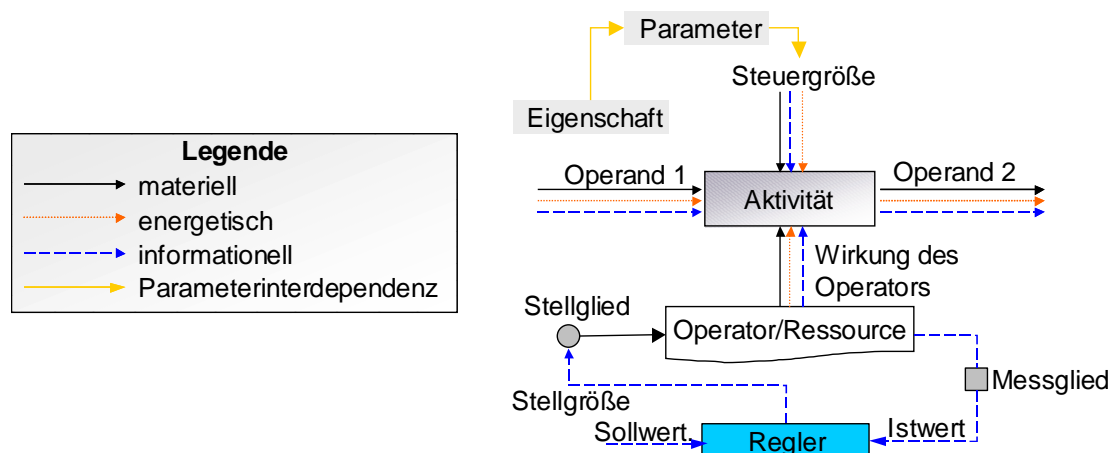


Bild 3.5: Modellierungsmethode durch Synthese der Ansätze von HUBKA und ROSS

Als Kombination beider Methodiken wird daher ein eigenes Konzept in Anlehnung an die Beschreibungselemente der SADT entwickelt und der gesamte Prozess ausgehend von jeder Aktivität entsprechend beschrieben (Bild 3.5). Die im Zentrum stehende Aktivität transformiert den Operand vom Ausgangszustand in den gewünsch-

ten Endzustand. Jede Aktivität muss dabei einen Operator/Ressource aufweisen. Die Art der Verrichtung an dem Transformationsobjekt wird durch verbale Ergänzungen näher beschrieben. Zusätzlich werden zur Unterscheidung der Einflussnahme farbige Pfeile verwendet, die einen Informations-, Energie- oder Materialfluss von Ressource zu Aktivität kennzeichnen. Analog werden Steuerflüsse als Anweisungen oder zu beachtende Restriktionen bei der Ausführung der Aktivität, entsprechend farbig gekennzeichnet. Die Steuergrößen für die Aktivität verlaufen dabei stets von oben nach unten. Die Parameter, die im Zuge der Bearbeitung von Operanden wirksam werden, werden direkt neben dem Input platziert und entsprechend grau gekennzeichnet. Zusätzlich werden Regelkreise implementiert. Der komplette Prozess wird entsprechend der vorgestellten Methodik auf Basis von Bild 2.6 im Detail modelliert.

Der Prozess (Anhang A) beginnt mit der Arbeitsvorbereitung. Diese beinhaltet: Planung der Fertigung, Wartung von Systemkomponenten, Rüsten der Werkzeugplattform, Generierung/Optimierung des Ablegepfads, Bereitstellung der Werkstoffe/Betriebsstoffe/Betriebsmittel und Anschluss alle System-Komponenten. Der eigentliche Prozess beginnt mit dem Einschalten der Temperierung bzw. Vorheizen. Während der Aufwärmphase erfolgt zusätzlich das Einlegen der Tapespulen und das Einfädeln des Tapes in den TLK (0-Rüsten). Der Prozess des Ablegens und Konsolidierens des Tapes entspricht dann der Beschreibung in Kapitel 2.2. Nach Absetzen des Tapes werden Aufheizvorrichtung und Vorschub ausgestellt. Sofern eine weitere Lage/Bahn abgelegt wird, beginnt der obere Prozess von Neuem. Ist das Laminat fertig gestellt, wird die Temperierung ebenfalls ausgestellt. Nach dem Abkühlen kann das Bauteil entnommen werden. Den Abschluss des Fertigungsprozesses bilden die Vorgänge Reinigung der Werkzeugplattform und Besäumen des Bauteils.

Der dargestellte Prozess ist um die beteiligten Operanden und Operatoren sowie die Prozessparameter erweitert. Die Prozessparameter werden dabei nicht losgelöst voneinander betrachtet, sondern vernetzt dargestellt. Die Darstellung verdeutlicht die Komplexität der Prozessführung. Diese komplexe Struktur kann aber nicht nur zu einem erweiterten und detaillierten Prozessverständnis verhelfen. Diese Ergebnisse fließen in die anlagentechnische Weiterentwicklung und insbesondere in den Aufbau einer Prozesssteuerung ein (Kapitel 4.5). Darüber hinaus orientiert sich das Qualitätsmanagement (Kapitel 4.7) an diesem Prozessmodell.

4 Untersuchungen zur Prozessentwicklung

4.1 Erfassung und Bewertung der Qualität von Thermoplast-Tapes

Die eingesetzten Tapes stellen sowohl für ihre Herstellung als auch Verarbeitung hohe Anforderungen an die Prozessgenauigkeit, um später Arbeitsergebnisse mit gleich hoher Qualität zu erhalten. Obwohl die äußere Geometrie und das Gefüge des Halbzeugs durch den Verarbeitungsprozess verändert werden (Bild 2.13), haben viele Eigenschaften des Halbzeugs einen großen Einfluss auf das spätere Arbeitsergebnis. So stellen sich hinsichtlich eines Serieneinsatzes des Thermoplast-Tapelegens folgende Fragen an das verwendete Halbzeug:

- Welche Halbzeugeigenschaften können zur qualitativen Unterscheidung von thermoplastischen Tape-Halbzeugen dienen?
- Welche unterschiedlichen Merkmale können bei den Halbzeugen erfasst werden?
- Wie korrelieren die Halbzeugeigenschaften mit Lamineigenschaften?
- Welche dieser Eigenschaften können im Rahmen der Qualitätssicherung zur Eingangskontrolle dienen?

Im Rahmen dieses Kapitels sollen Qualitätskriterien ermittelt werden, die der Bestimmung der Halbzeug-Qualität dienen können. Anschließend soll durch Versuche bestimmt werden, inwiefern die qualitativen Ausprägungen messbar bzw. erfassbar sind. Dabei steht nicht der quantitative Vergleich der Halbzeuge auf Basis der Messwerte sondern die Bewertung der Messbarkeit und die erfassten unterschiedlichen Ausprägungen der Tapes im Vordergrund.

4.1.1 Kriterien zur Erfassung der Qualität von Thermoplast-Tapes

Ziel ist die Herstellung eines unidirektionalen Verbundes mit möglichst gestreckten, imprägnierten und unbeschädigten Verstärkungsfasern. Der Verbund soll einheitliche und ausreichend gute mechanische Eigenschaften auf Basis eines homogenen Matrix- und Fasermaterials mit minimalen Poren bzw. Materialaufwerfungen durch Lücken oder Überlappungen zwischen den abgelegten Tapes aufweisen. Die Abweichungen der Bauteilgeometrie in Dickenrichtung und an den Kanten sollten ein zu-

lässiges Maß nicht überschreiten und die realisierbaren Verarbeitungsgeschwindigkeiten sollten möglichst hoch sein. Basierend auf den genannten Anforderungen können Eigenschaften des Tape-Halbzeugs herausgearbeitet werden, die einen potenziellen Einfluss auf die Erreichung des gewünschten Arbeitsergebnisses haben. Als Orientierung können hierbei die von EHLERS [83] genannten Qualitätskriterien dienen. Die in dieser Arbeit über diese ersten Ansätze hinaus identifizierten Qualitätskriterien sind einzeln hinsichtlich ihrer Aussage beschrieben und zusätzlich das entsprechende Verfahren zur Ermittlung bzw. Messung dieser Qualitätskriterien in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Identifizierte Qualitätskriterien und abgeleiteter Prüfplan

Qualitätskriterium	Gibt Information über	Prüfmethode (Bsp.)	Prüfplan (Bsp.)
Genauigkeit der Halbzeugbreite und -dicke	Genauigkeit des Herstellungsprozesses; Ablegebreite; Prozessplanung	Mit Messschieber Breite und Dicke messen	Messung beider Parameter über 50 m; alle 50 cm eine Messung
Konstanz der Halbzeugbreite und -dicke	Geometriekonstanz; Einstellbarkeit von Maschinenparametern; Ablegebreite	Mit Messschieber Breite und Dicke messen	Messung beider Parameter über 50 m; alle 50 cm eine Messung
Tapekante	Qualität der seitlichen Konsolidierung	Auflichtmikroskopie	5 Schliffe im Abstand von einem Meter
Tapeoberfläche	Möglicher Grad und Geschwindigkeit der Konsolidierung [84]	Oberflächenprofilometrie	Jeweils eine Probe
Vollständigkeit der Imprägnierung	Mechanische Eigenschaften des Verbunds; Beherrschung des Herstellungsprozesses	Auflichtmikroskopie	5 Schliffe im Abstand von einem Meter; Porengehalt messen
Genauigkeit des Faservolumenanteils	Genauigkeit des Herstellungsprozesses; Bauteilauslegbarkeit	Auflichtmikroskopie	5 Schliffe im Abstand von einem Meter; Fvol% messen
Konstanz des Faservolumenanteils	Auslegbarkeit; Faserschädigung	Auflichtmikroskopie	5 Schliffe im Abstand von einem Meter
Homogenität der Faserverteilung	Gleichmäßigkeit der Eigenschaften	Auflichtmikroskopie	2 Schliffe im Abstand von einem Meter
Faserstreckung	Beherrschung des Herstellungsprozesses; mechanische Eigenschaften des Verbundes, Faserondulationen	Auflichtmikroskopie; (optische Messung)	2 Schliffe im Abstand von einem Meter
Zugfestigkeit, -steifigkeit, Zugdehnung		Zugversuch	10 Zugversuche je Material nach DIN 65469
Scherfestigkeit		Modifizierter Zugversuch [85]	10 Zugversuche je Material

Alle Versuche wurden mit 10 unterschiedlichen Halbzeugen aus CF/PPS und CF/PEEK in den Dimensionen 5 x 0,2; 12 x 0,2; 5 x 0,4; 12 x 0,4; 6,1 x 0,2; 12,7 x 0,2 (Länge x Breite in mm) mit unterschiedlichen Faservolumengehalten durchgeführt.

4.1.2 Untersuchung der Qualität von Thermoplast-Tapes

Tapebreite und -dicke

Gemäß des Prüfplans werden die Parameter mit einem Messschieber erfasst. Die absoluten Abweichungen der Durchschnittsbreite vom Sollwert betragen maximal 0,15 mm. Bei der Tapedicke sind zwar nicht die absoluten aber die relativen Abweichungen höher. Auffällig ist, dass es mitunter zu längeren Ausschuss-Abschnitten kommen kann, in denen das Tape bis zu 50 % schmaler als der Sollwert ist. Die Variationskoeffizienten¹ [86] liegen zwischen 2 % und 8 %. Es lässt sich festhalten, dass die Tapebreite eine höhere Genauigkeit und Konstanz besitzt als die Tapedicke. Wenn auch die Messung beider Parameter relativ einfach ist, so besteht bei der Messung der Tapedicke der Fehlereinfluss durch hohe Oberflächenrauigkeiten. Bei hohen Rauigkeitswerten erfolgt praktisch nur eine Messung der Spitzenwerte.

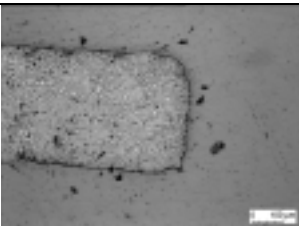
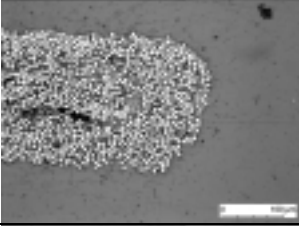
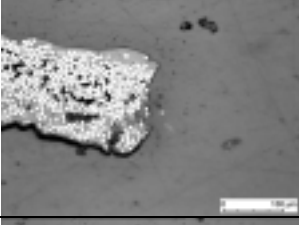
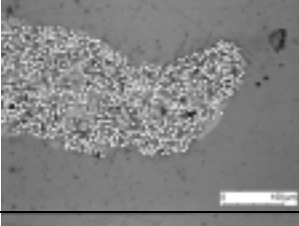
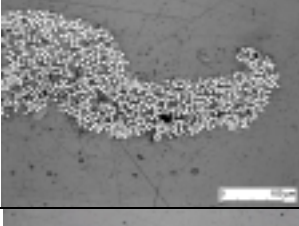
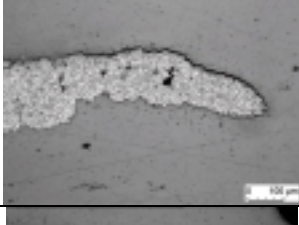
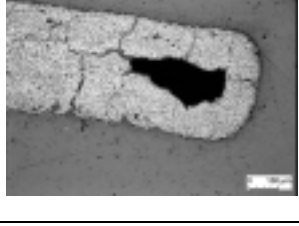
Tapekante

An der Kantengeometrie konnten sieben verschiedene Ausprägungskategorien identifiziert werden. In Tabelle 4.2 (siehe Seite 38) sind die unterschiedlichen Kantentypen aufgezeigt, deren Eigenschaften beschrieben und entsprechend ihrer Vorteilhaftigkeit für den Verarbeitungsprozess in eine Reihenfolge gebracht. Demnach ist eine rechteckige Kantengeometrie am besten geeignet. Die seitliche Verbindung zwischen den Tapes kann ungehindert und ohne ständige Anpassung des Maschinenparameters „Ablegebreite“ erfolgen. Die übrigen Kantengeometrien wirken sich zunehmend negativ auf die Laminatqualität aus. Hier steigt die Gefahr für Lunker und undefinierte Laminatoberflächen. Der Kantentyp „Lunker mit Riss“ ist am schlechtesten einzuordnen.

Zur Analyse der Tapes wurden je fünf Tapekanten links und rechts untersucht. Eine einheitliche Tendenz konnte dabei nicht festgestellt werden. Allerdings zeigt sich eine Abhängigkeit der Kantenform von der Kalibrierungsmethode. Durch seitlichen Beschnitt bei der Tapeherstellung entstehen tendenziell eher „Ausrisse“.

¹ Anmerkung: Der Variationskoeffizient berechnet sich aus dem Quotienten von Standardabweichung und arithmetischen Mittelwert. Er gibt die Variabilität einer Datenmenge wieder und hat den Vorteil einer normierten Größe (maßstabsunabhängig).

Tabelle 4.2: Unterschiedliche Kantentypen von faserverstärkten Thermoplast-Tapes

Kantentyp	Bild	Beschreibung	Tendenziell stärker werdender negativer Einfluss auf die Verarbeitungsqualität Prozessführung mit größerer seitlicher Überlappung erforderlich
Rechteckig (R) (Maßstab: Bildbreite entspricht 1 mm)		Nahezu rechteckige Geometrie mit weitestgehend gerader seitlicher Kante; seitliche Verbindung mit anderen Tapes bleibt unbeeinflusst	
Rechteckig mit Deformation (Rd) (Maßstab: Bildbreite entspricht 0,5 mm)		Weitestgehend rechteckige Geometrie, jedoch mit stärkeren Deformationen (Abrundungen) an den Ecken oder der seitlichen Kante; nur geringe Beeinflussung der Verbindungsstelle	
Ausriss (Ar) (Maßstab: Bildbreite entspricht 0,5 mm)		Rechteckige Kontur mit stärkeren Deformationen und Faserausrissen an der seitlichen Kante; Gefahr der Lunkerbildung während der seitlichen Verbindung	
Kleiner Haken (Hk) (Maßstab: Bildbreite entspricht 0,5 mm)		Rechteckige Kontur kaum vorhanden; konkave Deformation auf der Tapeoberseite ² ; an der Verbindungsstelle ist mit Unebenheiten zu rechnen	
Großer Haken (Hg) (Maßstab: Bildbreite entspricht 0,5 mm)		Rechteckige Kontur ist nicht mehr vorhanden; starke konkave Deformation auf der Tapeoberseite; die seitliche Verbindung ist beeinträchtigt und wird von starken Unebenheiten begleitet	
Verschmierung (Ve) (Maßstab: Bildbreite entspricht 1 mm)		Tapekante besitzt eine weit ausgedehnte undefiniert, verschmierte Kontur; die seitliche Verbindung kann nur für einen kleinen Bereich erfolgen, es ist mit einer starken Reduzierung der Laminatdicke in der Verbindungsstelle zu rechnen	
Lunker mit Riss (Lr) (Maßstab: Bildbreite entspricht 1 mm)		Weitestgehend rechteckige Geometrie, jedoch mit sehr starker Lunker- und Rissbildung; die seitliche Verbindung ist zwar möglich, es muss allerdings von einer starken Laminatschädigung in der Verbindungszone ausgegangen werden	

2

Als Tapeoberseite wird die Seite definiert, die sich als Oberseite auf der Halbzeugspule befindet.

Dagegen verursacht die Kalibrierung mit Hilfe einer Düse im schmelzflüssigen Zustand häufig „Haken“ an der Tapekante. Problematisch für die Bewertung der Tapequalität scheint hier, dass sich die Kantengeometrie entlang des Tapes fortlaufend ändert und eine einheitliche Aussage erschwert. Hier sind die Tape-Hersteller aufgerufen den Herstellungsprozess hinsichtlich dieser Ausprägungen zu stabilisieren.

Oberflächenrauigkeit

Zur Untersuchung der Oberflächenrauigkeit wurde bei allen zehn Tapes ein jeweils 10 mm langes Teilstück auf der Ober- und Unterseite mit Hilfe eines Laserprofilometers (UBM - Ulrich Breitmeyer Messtechnik) abgescannt. Von der aufgenommenen Fläche wurde jeweils für fünf Querschnitte die Mittenrautiefe (R_a) bestimmt. Die durchschnittlichen Mittenrautiefen liegen zwischen 0,5 bis 8 μm . Die Unterschiede können durch unterschiedliche Faservolumengehalte und Schmelzviskositäten der Matrices bei der Tape-Herstellung begründet sein. Bild 4.1 zeigt exemplarisch zwei Oberflächen im direkten Vergleich. Das Bild 4.1b lässt erkennen, wie eine hohe Oberflächenrauigkeit die Messung der Tapedicke negativ beeinflussen kann.

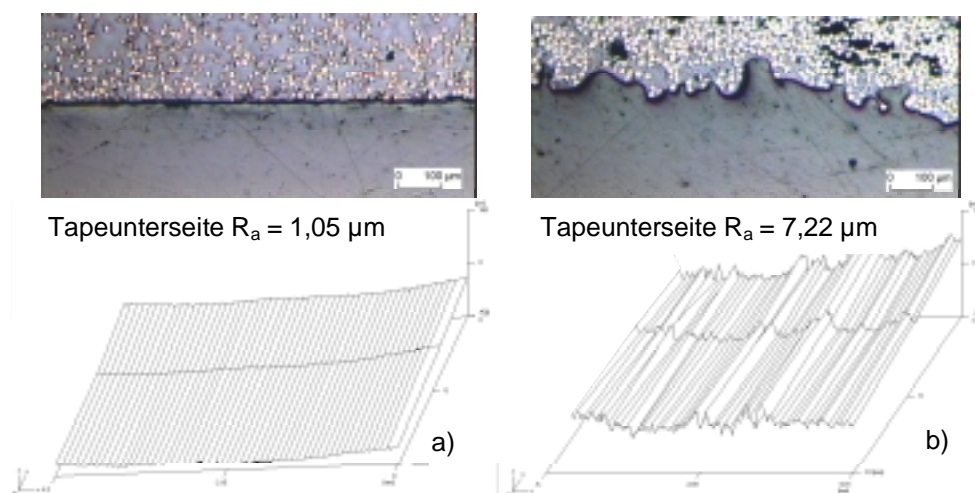


Bild 4.1: Oberflächenprofile und Schliffbilder eines glatten a) und rauhen Tapes b)

Zwischen Ober- und Unterseite sind keine eindeutigen Unterschiede auszumachen. Es fällt auf, dass sich der Mittenrauwert mit zunehmender Tapebreite und noch stärker mit zunehmender Tapedicke erhöht. Da sich mit größer werdendem Querschnitt auch die Materialmenge erhöht, könnte dieses Phänomen mit stärkeren Fließvor-

gängen an der Kalibrierdüse und stärkerem Einfluss durch Schrumpf während der Verfestigung zusammenhängen. Weiterhin zeigen Halbzeuge mit niedrigerer Schmelzviskosität tendenziell einen höheren R_a -Wert, was ebenfalls auf stärkere Fließvorgänge zurückzuführen ist.

Vollständigkeit der Imprägnierung

Ein exaktes Verfahren zur Messung der Faservolumen- und Porengehalte ist die chemische Analyse in Verbindung mit einer Dichtemessung. Aus technischen Gründen erfolgen die Messungen in dieser Arbeit mit Hilfe der Imtronic Software ImageC. Hierzu werden je Halbzeug fünf Schliffproben im Abstand von etwa einem Meter mit dem Auflichtmikroskop und ImageC analysiert. Anzumerken ist, dass die Schliffe für eine derartige Auswertung sehr gut präpariert sein müssen. Jedoch lassen sich gewisse Fehler durch z.B. Faserausbrüche bei Kohlenstofffasern nicht ausschließen. Auf Basis der Erfahrungen im Rahmen der Untersuchungen kann der Messfehler durch manuelle Einstellung je nach vorliegendem Schliff und gewählter Vergrößerung ca. 10 % betragen. Untersucht wird der Porengehalt links, rechts und in der Mitte der Proben. Eine Analyse des gesamten Querschnitts ist aufgrund der benötigten hohen Auflösung und der somit erforderlichen Vergrößerung nicht möglich. Zusätzlich wird die Konstanz der Imprägnierung über den Variationskoeffizienten in Längsrichtung bestimmt.

Die Ergebnisse bei den durchschnittlichen Porengehalten weisen deutliche Unterschiede von 1,5 % bis 7 % auf. Die Schliffbilder zeigen im Fall höherer Porengehalte, dass die Mikroimprägnierung [87] noch nicht abgeschlossen ist. Die Zentren der noch klar erkennbaren Faserbündel sind nicht vollständig imprägniert (Bild 4.2). Um die Faserbündel herum bilden sich matrixreichere Zonen, die mitunter für die hohe Oberflächenrauigkeit ursächlich sein können. Stellenweise kommt es hierdurch auch zu einer Matrixakkumulation, die sich in vertikaler Richtung über die gesamte Tapedicke erstreckt. Weiterhin fallen die Schwankungen über den Tapequerschnitt auf. Die Variabilität in Längsrichtung liegt fast ausnahmslos über 40 %. Diese starken Schwankungen sind wahrscheinlich auf die lediglich lokal mögliche Auswertung aber auch auf Schwankungen im Herstellungsprozess zurückzuführen.

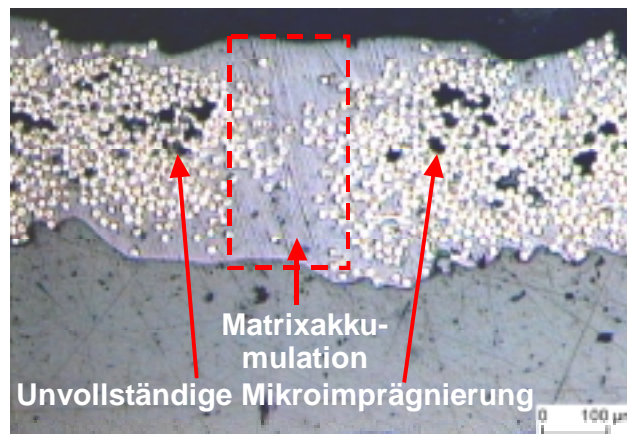


Bild 4.2: Unvollständige Mikroimprägnierung und Matrixakkumulation im Tape

Faservolumenanteil

Die ebenfalls mit ImageC ermittelten Faservolumenanteile liegen weitestgehend im Bereich der Sollwerte. Abweichungen können aus ungleichmäßiger Faserverteilung über den Querschnitt und dem bereits beschriebenen Messfehler des optischen Verfahrens resultieren. Die Variabilität in Längsrichtung liegt durchschnittlich bei ca. 10 %, was auf eine Ondulation der Fasern schließen lässt. Basierend auf den Untersuchungen zum Faservolumengehalt ist die Faserverteilung insgesamt in Längs- und Querrichtung leicht ungleichmäßig. Aufgrund der Auswerteproblematik sollte diese Analyseverfahren für eine Wareneingangsuntersuchung von Faser- und Porengehalten verworfen und das chemische Verfahren vorgezogen werden.

Homogenität der Faserverteilung

Die Faserverteilung über den Tapequerschnitt hat u.a. Einfluss auf die Imprägnierung, die Oberflächenbeschaffenheit und die mechanischen Eigenschaften des einzelnen Tapes. Die Untersuchung der Faserverteilung erfolgt mit Hilfe der Auflichtmikroskopie. Prinzipiell fielen folgende Ausprägungen auf:

- weitestgehend gleichmäßige/ungleichmäßige Verteilung,
- matrixreiche Zonen,
- faserreiche Zonen
- und Fasersedimentation in Dickenrichtung.

Diese Unterscheidungen lassen jedoch keine allgemeine oder relative Einordnung bzw. einen Vergleich zu. Daher wurde mit ImageC das Schliffbild optisch ausgewertet. Hierzu mussten zunächst einzelne Aufnahmen des Tapequerschnitts zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden. Als problematisch erwiesen sich hierbei raue Oberflächen sowie die Krümmung der Tapes über den Tapequerschnitt, da bei der Auswertung nur ein rechteckiges Bild benutzt werden kann. Daher werden Rauheiten durch einen geraden Schnitt begradigt und Krümmungen durch Drehen der einzelnen Tapeabschnitte korrigiert. ImageC erlaubt die elektronische Bestimmung des durchschnittlichen Aufenthaltsortes der Fasern in X- und Y-Richtung (Faserflächenschwerpunkt) sowie deren Standardabweichung über den Tapequerschnitt. Die Werte werden in μm bezogen auf die linke untere Ecke des Tapequerschnitts angegeben (Bild 4.3).

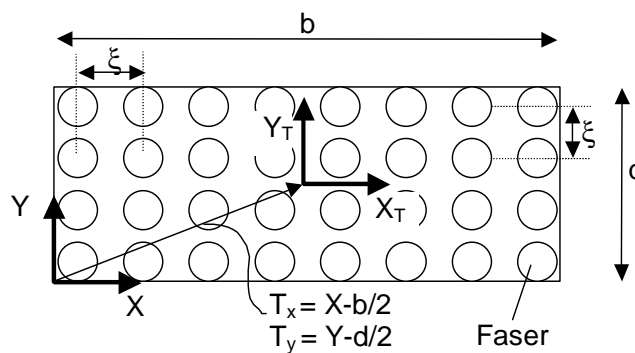


Bild 4.3: Transformation des Koordinatensystems im Tapequerschnitt

Um eine bessere Vorstellung für die Homogenität der Faserverteilung zu bekommen, werden die ermittelten Werte in die Mitte des Tapequerschnitts transformiert. Bei vollkommener Gleichverteilung ergibt sich für den durchschnittlichen Aufenthaltsort in X- und Y-Richtung jeweils Null. Die Transformation der Standardabweichung ist nicht erforderlich. Die Ermittlung eines Sollwertes für die Standardabweichung bedarf jedoch weiterer Überlegungen. Es werden hierzu folgende Annahmen getroffen (Bild 4.3): vollkommene Gleichverteilung im quadratischen Raster, Abstände zwischen den Fasermittelpunkten sind in horizontaler und vertikaler Richtung gleich (ξ), das Koordinatensystem liegt in der Mitte des Querschnitts. Die Lage des Faserflächenschwerpunktes gibt Auskunft über Richtung und Grad der Ungleichverteilung. D. h., sind die Fasern hauptsächlich links (T_x negativ), rechts (T_x positiv), oben (T_y positiv), oder unten (T_y negativ) in bezug auf den Querschnitt angeordnet.

Bei den untersuchten Tapes liegen die Faserflächenschwerpunkte zwar weitestgehend mittig im Querschnitt, allerdings zeigen sich Verschiebungen von bis zu 30 % in Y-Richtung. Diese Ergebnisse bestätigen die bereits häufig bei der Auflichtmikroskopie festgestellte Fasersedimentation in Dickenrichtung. Die Fasersedimentation kann eine Folge der Fließrichtung beim Imprägnieren an Umlenkrollen bei nicht vollständig konsolidierter Matrix sein.

Die Standardabweichung ist ein Maß für die gleichmäßige Bedeckung der Querschnittsfläche. Liegt die Standardabweichung über dem Sollwert, so sind die Fasern mehr am Rand des Tapes angeordnet und vice versa. Die Standardabweichung bei vollkommener Gleichverteilung ist in Gleichung 4.1 hergeleitet. Tendenziell liegt der Messwert unter dem Sollwert, was bedeutet, dass die Fasern leicht mittig angeordnet sind bzw. die Matrix sich am Rand befinden. Ursächlich dafür ist der Imprägnierungs- und Kalibrierungsprozess.

Gleichung 4.1: Herleitung der Soll-Standardabweichung bei Gleichverteilung

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 = 2 \cdot n_y \cdot \sum_{k=1}^{n_x/2} (k \cdot \xi - 0)^2 = 2 \cdot n_y \cdot \xi^2 \cdot \sum_{k=1}^{n_x/2} k^2$$

$$\text{mit} \quad n_x = \frac{b}{\xi} + 1 \cong \frac{b}{\xi} \quad \text{mit} \quad n_y = \frac{d}{\xi} + 1 \cong \frac{d}{\xi} \quad \text{mit} \quad n = n_x \cdot n_y$$

$$\text{mit} \quad \sum_{k=1}^{n_x/2} k^2 = \frac{\frac{n_x}{2} \cdot \left(\frac{n_x}{2} + 1\right) \cdot \left(2 \cdot \frac{n_x}{2} + 1\right)}{6} \cong \frac{n_x^3}{24}$$

$$\Rightarrow s_x = \sqrt{\frac{1}{n_x \cdot n_y} \cdot 2 \cdot n_y \cdot \xi^2 \cdot \frac{n_x^3}{24}} = \sqrt{\frac{\xi^2 \cdot n_x^2}{12}} = \sqrt{\frac{\xi^2 \cdot b^2}{12 \cdot \xi^2}} = \frac{b}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad \text{analog} \quad s_y = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

$$\text{analog} \quad s_r = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

Faserstreckung

Vollständig gestreckte Fasern sind wichtig für gute mechanische Kennwerte. Allerdings dürfte es bei der Tapeherstellung Schwierigkeiten bereiten, die Fasern in vollständig gestreckter Form einzubetten, da die Fasern schon im Roving wellig vorliegen. Die Analyse der Faserstreckung ist schwierig, da z.B. Kohlenstofffasern röntgentransparent oder Längsschliffe nur schwierig auswertbar sind. Bisherige Ansätze

beruhen daher auf dem Einsatz von Ultraschall zur Analyse von (imprägnierten) Fasern [88] oder dem Ausmessen der Faserschnittflächen (elliptisch, bei ondulierten Fasern). Ein weiterer Ansatz ermöglicht eine Rechner-gestützte Auswertung der Faserorientierungen von 3-dimensionalen Bildern [89]. In dieser Arbeit wird eine neue Vorgehensweise auf Basis der Untersuchungen zur Faserverteilung entwickelt.

Wie in Bild 4.4 dargestellt, verändert sich die Faserverteilung in den einzelnen Schnittebenen eines Tapes bei nicht gestreckten Fasern. Je nach Streckungsgrad ist mit einer Veränderung des Faserflächenschwerpunkts und der Standardabweichung zu rechnen. Gemäß des vorangegangenen Kapitels sind diese beiden Parameter messbar. So werden im Rahmen der Studie exemplarisch für ein Tape zwei Schliffe im Abstand von einem Meter analysiert. Anhand der Standardabweichungen kann festgestellt werden, dass zwar die Homogenität der Faserverteilung gleichbleibend gut ist, jedoch der Faserflächenschwerpunkt bereits in 1 m Abstand um ca. $120\ \mu\text{m}$ verschoben ist. Hierbei bleibt allerdings unberücksichtigt, ob und inwieweit Ondulationen auf dem Zwischenstück vorliegen. So ist festzuhalten, dass die quantitative Erfassung der Faserondulation auch mit dieser Vorgehensweise aufwendig bleibt.

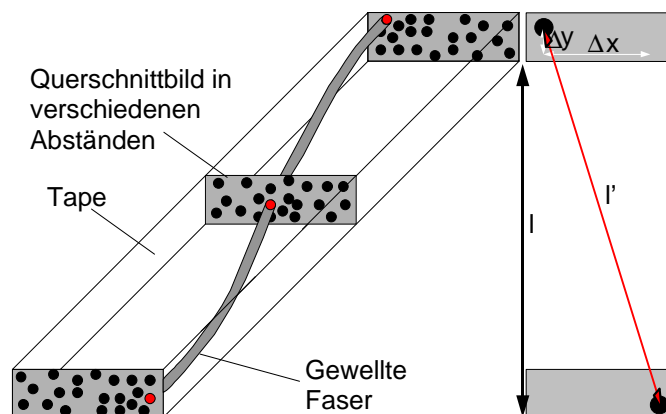


Bild 4.4: Veränderung der Faserverteilung im Querschnitt bei gewellten Fasern

Zugversuche

Die Zugversuche wurden nach DIN 65469 durchgeführt. Hierbei wurden die Sollwerte (Hersteller-Angaben) weitestgehend erfüllt. Schwierigkeiten bei diesen und auch den anderen mechanischen Tests bereitet der Vergleich mit den Hersteller-Angaben, da bisher keine Angaben zu den dort verwendeten Prüfnormen vorliegen. Eine Fehlerquelle, die zum Teil zu Abweichungen von den Sollwerten führte, stellt die zu gro-

ße Bezugsquerschnittsfläche, die z.B. durch die Oberflächenrauigkeit gemessen wird, dar.

Erwähnenswert ist zudem das bei den Zugversuchen festgestellte unterschiedliche Schadensverhalten. Während manche Tapes gleichzeitig über die gesamte Breite versagen, reißen andere strangweise. So liegt der Schluss nahe, dass die Fasern nicht vollständig gestreckt in der Längsachse vorliegen und somit unterschiedliche Dehnungen über die Tapebreite hervorgerufen werden.

Scherversuche

Aufgrund der geringen Halbzeugdicke gestaltet sich die Messung der Scherfestigkeit schwierig. Geeignet erscheint daher die Vorgehensweise von LUTZ [85], bei der Tapes in einem definierten Abstand links und rechts bis zur Tapemitte eingeschnitten werden. Das Tape wird anschließend axial mit einer Zugspannung beaufschlagt, so dass sich zwischen den Einschnitten eine Scherebene bildet.

Die in Bild 4.5 angegebenen Längen für die Probe (150 mm), die Einschnitt-Distanz (50 mm) und die Einschnitttiefe ($\sim b/2$) wurden durch mehrere Vorversuche ermittelt. Die Reproduzierbarkeit der Einschnitttiefe wird durch eine Schablone gewährleistet.

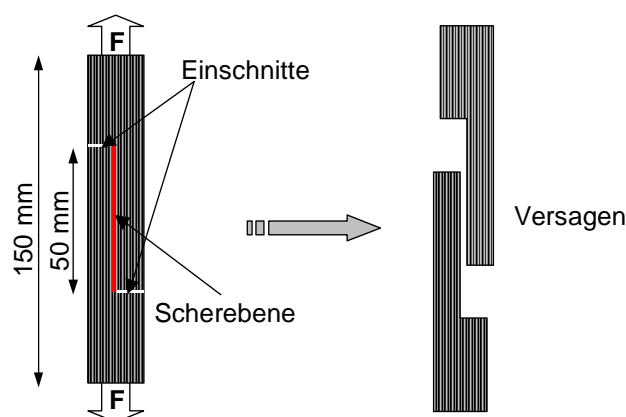


Bild 4.5: Schertest von Tapes nach LUTZ [85]

Die durchschnittlichen Scherfestigkeiten liegen unabhängig vom Halbzeug mit etwa 17 MPa auf einem sehr niedrigen Niveau. Ursächlich erscheint die nicht optimale Prüfungsmethode, bei der neben Scherung auch Schälung und Biegung auftreten

können sowie die Messung der Bezugsfläche, was aufgrund der Tapedimensionen schwierig ist.

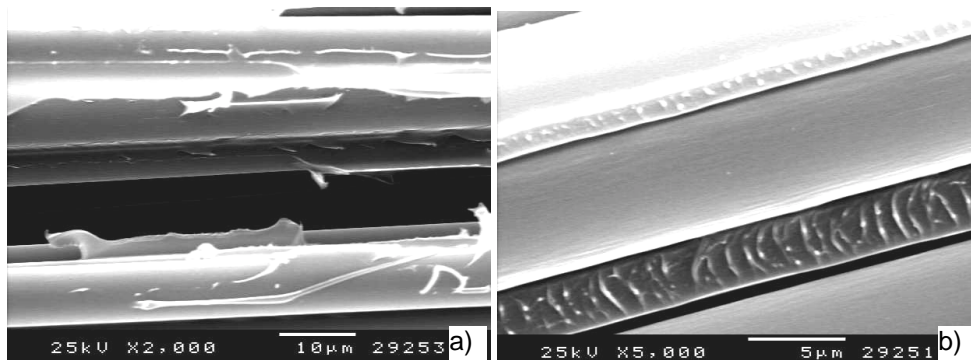


Bild 4.6: REM-Bilder der Scherbruchflächen von Tapes a) und b)

Die Untersuchung der Bruchflächen mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) zeigen (Bild 4.6), dass die Faser-Matrix-Anhaftung bei allen Halbzeugen nicht hoch ist. An den Fasern selbst oder in den Faserbetten sind keine charakteristischen Scherdeformationen auf Matrixresten zu erkennen. Lediglich die Matrix zwischen den Fasern zeigt diese Spuren. Die Grenzflächen dieser Halbzeuge sind daher zu optimieren, da sie derzeit einen zu geringen Beitrag zur Festigkeit leisten.

4.1.3 Entwicklung und Umsetzung eines Qualitätskennzahlensystems

Bei der Analyse der Halbzeugqualität wurden insgesamt 15 Qualitätskriterien für faserverstärkte, thermoplastische Tapehalbzeuge identifiziert. Um die gewonnenen qualitativen Informationen für operative Entscheidungen in der Fertigung zur Verfügung stellen zu können, ist es nicht ratsam, sie unverdichtet weiterzugeben. Sollen Zahlen als Steuerungsinstrument dienen, sollte das Zahlenmaterial übersichtlich und in konzentrierter Form aufbereitet werden. Es bedarf daher eines Qualitätskennzahlensystems, das sich an der Quantifizierbarkeit der erfassten Daten und der inhaltlichen Aussage zweckmäßig orientiert. Unter einem Qualitätskennzahlensystem (QKS) versteht man „ein in sich geschlossenes Bewertungssystem, das unter Bildung von Fehlerklassen und/oder der Verwendung von gewichteten Fehleranteilen von Einheiten bzw. anderen relevanten Basisgrößen und unter Festlegung einer geeigneten Berechnung (Formel) die Ermittlung von Qualitätskennzahlen gestattet.“ Eine Qualitätskennzahl (QKZ) „ist ein Kennwert, der mit Hilfe des zugehörigen QKS ermittelt wird

und die Beurteilung der Qualität bzw. den Vergleich mit Qualitätsstandards zulässt“ [90]. Man unterscheidet absolute Kennzahlen und Verhältniszahlen. Die Berechnung von Verhältniszahlen erfolgt entweder als Quotient oder als Prozentsatz [91]. Allerdings entsteht häufig das Problem, die Zahlen nicht direkt miteinander mathematisch verrechnen zu können. Eine wirkliche Quantifizierbarkeit eines Qualitätsparameters oder Berechenbarkeit von QKZ ist jedoch nur in kardinalen Skalen möglich [92]. Sollten also nicht direkt kardinal-skalierte Messergebnisse vorliegen, muss eine Skalentransformation durchgeführt werden [93].

Ziel dieser Studie ist die Generierung einer einzigen aussagekräftigen Qualitätskennzahl, die sowohl eine absolute Information (Einsetzbarkeit des Halbzeugs) und eine relative Information (Vergleich zu anderen Halbzeugen) beinhaltet. Hierzu werden die 15 Qualitätskriterien zunächst in die drei inhaltlichen Qualitätscluster (QC) makroskopisch (M_a), mikroskopisch (M_i) und mechanisch (M_e) unterteilt und dann zum Quality Index for Thermoplastic Tapes (Q.I.T.T.) als maßgebliche Qualitätskennzahl zusammengefasst (Bild 4.7).

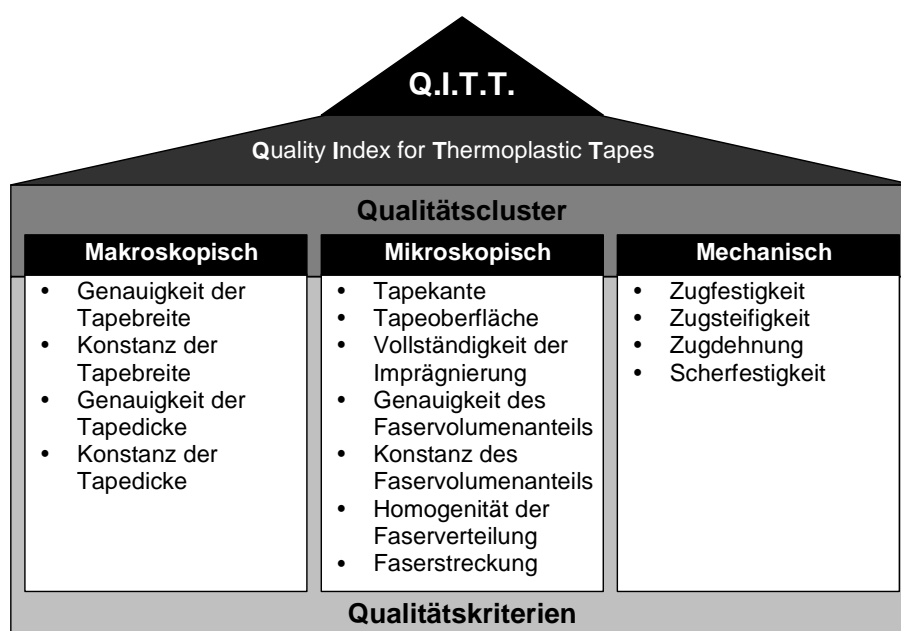


Bild 4.7: Einteilung der Qualitätskriterien in Qualitätscluster

Diese qualitative Darstellung wird nun durch mathematische Verknüpfung in ein Qualitätskennzahlensystem überführt. Demnach errechnet sich der QITT eines Tapes durch die Summe über die Werte für die einzelnen QC (Gleichung 4.2). Hierdurch wird im Gegensatz zu den QC vermieden, dass die gesamte QKZ zu Null wird, nur

wenn ein einzelner Qualitätswert (Qw) gleich Null ist. Die QC selbst berechnen sich durch das Produkt über die einzelnen Qualitätswerte der Qualitätskriterien.

Gleichung 4.2: Berechnung des QITT aus QC

$$QITT = \sum_j QC_j = M_a + M_i + M_e = \sum_j \prod_i Qw_{ji}$$

Zur Normierung der Ergebnisse gilt, dass der Wert Qw nur zwischen 0 und 1 liegen kann. Demnach ergeben sich folgende Intervalle für die berechneten Werte: $QC_j \in [0...1]$, $QITT \in [0...3]$. Hierbei entsteht das bereits beschriebene Problem, dass alle Qw in kardinale Skalen messbar oder überführbar sein müssen.

Das einzige nicht direkt kardinal messbare Qualitätskriterium ist die Tapekante. Hier liegen zunächst nur nominale Unterscheidungen vor. Diese werden zu Kategorien (Kantentypen) zusammengefasst, was bereits eine ordinale Skala darstellt. Die endgültige Transformation der Daten in eine kardinale Skala erfolgt über ein Rating. Mittels Schätzurteil wird eine Transformationstabelle aufgestellt, die jeder Kategorie einen kardinalen Wert zuweist³: R = 1; Rd = 0,92; Ar = 0,83; Hk = 0,75; Hg = 0,67; Ve = 0,58; Lr = 0,5.

In der Tabelle 4.3 werden zu allen Qk die daraus ableitbaren Qw dargestellt. Die Algorithmen zur Berechnung der Qw basieren auf Verhältniszahlen bzw. Beziehungszahlen, um Einfluss absoluter Mess- oder Sollwerte zu vermeiden. Die Berechnungen sind somit vom Material und den Abmessungen des Tape-Halbzeugs unabhängig. Die Algorithmen stellen einen ersten Ansatz dar. Die mathematische Aufbereitung der Messdaten und Verdichtung zum QITT ist zukünftig auf Basis weiterer Erkenntnisse zu optimieren. Die dazu erforderlichen Untersuchungen sind aber erst möglich, wenn Tapes verfügbar sind, die konstante Eigenschaften in Längsrichtung aufweisen und eine getrennte Analyse der einzelnen Qk gestatten.

³ Anmerkung: Zukünftig ist die Transformationstabelle den weiteren Erkenntnissen anzupassen.

Tabelle 4.3: Ableitung der Berechnungswerte für Qw

Qualitätskriterium (Qk)	Messwert (Skala)	Normierender Vergleichswert	Qualitätswert (Qw) []
Genauigkeit der Tapebreite	b [mm], Durchschnittliche Tapebreite (kardinal)	SW [mm], Sollwert/Bestellwert	$Qw = 1 - (b/SW) - 1 $
Genauigkeit der Tapedicke	d [mm], Durchschnittliche Tapedicke (kardinal)	SW [mm], Sollwert/Bestellwert	$Qw = 1 - (b/SW) - 1 $
Konstanz der Tapebreite	Var_B [1/100], Variabilität der Tapebreite (kardinal)	Konstant, $Var_B = 0$	$Qw = 1 - Var_B$
Konstanz der Tapedicke	Var_D [1/100], Variabilität der Tapedicke (kardinal)	Konstant, $Var_D = 0$	$Qw = 1 - Var_D$
Tapekante	Geometrie (nominal)	Transformations-tabelle	$Qw = (1/n) \cdot \sum K_k$ mit $K_k \in \{Lr = 0,5; Ve = 0,58; Hg = 0,67; Hk = 0,75; Ar = 0,83; Rd = 0,92; R = 1\}$
Tapeoberfläche	R_a [μm], durchschnittl. Mittenrauwert (kardinal)	Glatte Oberfläche, $R_a = 0$	$Qw = 1 - (R_a/100)$
Vollständigkeit der Imprägnierung	P [1/100], durchschnittl. Porengehalt (kardinal)	Vollständige Imprägnierung, P = 0	$Qw = 1 - P$
Genauigkeit des Faservolumenanteils	Fvol% [1/100], durchschnittl. Faservolumengehalt (kardinal)	SW [%/100], Sollwert/Bestellwert	$Qw = 1 - (Fvol\%/SW) - 1 $
Konstanz des Faservolumenanteils	Var_F [1/100], Variabilität des Faservolumengehalts (kardinal)	Konstant, $Var_F = 0$	$Qw = 1 - Var_F$
Homogenität der Faserverteilung	X [μm], y, [μm], durchschnittl. Aufenthaltsort der Fasern; s [μm], Standardabweichung mit $s_r = (s_x^2 \cdot s_y^2)^{1/2}$; (kardinal)	Tapemittelpunkt mit Gleichverteilung: $SW_x = 0$; $SW_y = 0$; $SW_{s_x} = b/(2 \cdot 3^{1/2})$; $SW_{s_y} = d/(2 \cdot 3^{1/2})$ mit $SW_{s_r} = (SW_{s_x}^2 \cdot SW_{s_y}^2)^{1/2}$	$Qw = (1 - 2 \cdot x/b) \cdot (1 - 2 \cdot y/d) \cdot (1 - s_r/SW_{s_r})$
Faserstreckung	X_0 [μm], y_0 , [μm], X_1 [μm], y_1 [μm], durchschnittl. Aufenthaltsort der Fasern im Abstand von einem Meter; s [μm], Standardabweichung; (kardinal)	(vorherige Messung)	$Qw = (1 - 2 \cdot x_1 - x_0 /b) \cdot (1 - 2 \cdot y_1 - y_0 /d) \cdot (1 - s_1/s_2)$
Zugfestigkeit	σ [N/mm²], durchschnittl. Zugfestigkeit (kardinal)	SW [N/mm²], Sollwert	$Qw = \min\{1; (\sigma/SW)\}$
Zugsteifigkeit	E [N/mm²], durchschnittl. E-Modul (kardinal)	SW [N/mm²], Sollwert	$Qw = \min\{1; (E/SW)\}$
Zugdehnung	ε [N/mm²], durchschnittl. Zugdehnung (kardinal)	SW [N/mm²], Sollwert	$Qw = 1 - \varepsilon/SW - 1 $
Scherfestigkeit	τ [N/mm²], durchschnittl. Scherfestigkeit (kardinal)	SW [N/mm²], Sollwert	$Qw = \min\{1; (\tau/SW)\}$

4.1.4 Relevanz der Qualitätskriterien für den Ablegeprozess

Die determinierten Qualitätsparameter sind nur dann im Rahmen einer Wareneingangsprüfung zu untersuchen, wenn die Eigenschaften des abgelegten Tapes mit ihnen korrelieren. Daher wurden bis auf die Untersuchung der Faserstreckung sämtliche mikro- und makroskopischen Analysen an abgelegten Tapes wiederholt. Dazu

wurden jeweils drei einzeln und drei doppelt abgelegte Tapeastreifen hergestellt. Bei den doppelt abgelegten Tapes konnte die Tapebreite nicht analysiert werden, da die Tapes mangels Fadenspannung seitlich etwas verrutschten. Ursächlich war die Verwendung einzelner vorher vermessener und gekennzeichnete Streifen, um auch nach dem Ablegevorgang wieder die gleichen Stellen zu vermessen. Außerdem wurde die Messung des Faservolumengehalts nicht durchgeführt, da sich gezeigt hat, dass die optische Messung im Vergleich zur chemischen zu Ungenauigkeiten führt. Die Ergebnisse der Analyse sind nachstehend aufgeführt:

- Tapegeometrie

Beim Ablegen findet eine Verbreiterung der Tapes, eine Reduzierung der Dicke und eine Erhöhung des Variationskoeffizienten der Ablegebreite statt, wobei diese Effekte bei den Tapes, deren Matrices geringere Schmelzviskositäten aufweisen, stärker sind. Die noch starke Welligkeit in Dickenrichtung bei der ersten Lage reduziert sich mit zunehmender Laminatdicke. Gleichzeitig sinkt der Variationskoeffizient der Ablegedicke. Im Vergleich zur Ablegedicke ist die Ablegebreite reproduzierbarer und die Gesamtproduzierbarkeit des Verbunds steigt mit geringerer Halbzeugdicke.

- Tapeanten

Der Ablegevorgang bewirkt durch den Fließvorgang keine Homogenisierung der Kantengeometrie. Die Kantentypen bleiben weitestgehend erhalten oder verschlechtern sich weiter. Bei niedrigeren Schmelzviskositäten sind die Qualitätsverluste größer.

- Porengehalt

Der Porengehalt der abgelegten Tapes nimmt generell ab. Allerdings kann es aufgrund von Prozess-Einflüssen auch zu einer Zunahme des Porengehalts bei den ersten Lagen kommen.

- Oberflächenrauigkeit

Die Laminatoberseite bzw. schmale Tapes sind immer deutlich rauer als die Werkzeugseite bzw. breite Tapes. Dagegen sind bei Halbzeugen mit höheren Schmelzviskositäten die dünnen Tapes rauer als die dicken und vice versa.

- Faserverteilung

Hinsichtlich der Faserverteilung konnte keine Korrelation zwischen den Halbzeugen und den abgelegten Tapes gefunden werden. Allerdings zeigt sich bei den abgelegten Tapes eine zunehmende Fasersedimentation.

Fazit: Es lässt sich festhalten, dass mit der in dieser Studie vorgestellten Systematik qualitative Unterschiede zwischen faserverstärkten Tapes identifizierbar und auch in Form einer Qualitätskennzahl teilweise quantifizierbar sind. Derzeit ist die Quantifizierbarkeit aufgrund der zum Teil ungeeigneten Messmethoden noch stark eingeschränkt. Allerdings können bereits Unterschiede in den einzelnen Qualitätskriterien herausgearbeitet werden und in die Halbzeugoptimierung einfließen. Das herausgearbeitete Qualitätskennzahlensystem stellt einen ersten brauchbaren Ansatz dar. Jedoch sind die Algorithmen zur Berechnung der QITT-Werte weiter zu verbessern. Dies liegt insbesondere daran, dass die Q_w gleichgewichtet in die Rechnungen eingehen. Zukünftig ist weiter zu untersuchen, wie stark der Einfluss der Q_k auf die Laminatqualität ist bzw. ob er überhaupt berücksichtigt werden muss. Diese Untersuchungen sind derzeit noch nicht möglich, da die Halbzeuge zum einen keine konstanten Eigenschaften in Längsrichtung besitzen. Zum anderen überlagern sich die Einflüsse bei den verfügbaren Halbzeugen, so dass die Q_k nicht getrennt voneinander untersucht werden können. Auf Basis der dargestellten Ergebnisse der Ablegeversuche in Verbindung mit den Prozessanforderungen erscheinen folgende Analysen für eine Wareneingangsuntersuchung sinnvoll: Genauigkeit der Breite/Dicke, Variabilität der Breite, Kantengeometrie, Faservolumen- und Porengehalt.

4.2 Erstlagenproblem

Für das Ablegen der ersten Lage bestehen folgende Anforderungen für die Werkzeugplattform:

- Anhaftung ausreichend zur Fertigung gekrümmter Geometrien,
- funktionale Flexibilität hinsichtlich der Bauteilgröße und -formkomplexität,
- Werkzeugplattform mit hoher Temperaturbeständigkeit,
- dem Anpressdruck entsprechende Formsteifigkeit,

- Anhaften von Beginn bis Ende des Prozesses
- und beschädigungsfreies Ablösen vom Werkzeug.

4.2.1 Bisherige und mögliche neue Lösungsansätze

Obwohl der gesamte Fertigungsprozess nicht ohne das reversible Anhaften der ersten Lage sinnvoll funktioniert, existieren kaum serienreife Ansätze zur Lösung der Erstlagenproblematik. So benutzte STEINER doppelseitige Klebebänder, an die er die erste Lage anhaften ließ [11]. VOR DEM ESCHE stellte ein kombiniertes Vorgehen aus Klebestreifen und Klemmrahmen vor [70]. Diese Lösungen scheiden für Serienprozesse aus, da das Aufbringen von Klebstoffen, Klebebändern etc. die Werkstoffeigenschaften und die Oberfläche des Bauteils durch Verunreinigungen nachteilig beeinflussen. Diese Materialanhaftungen beeinträchtigen z.B. eine anschließende Lackierung der Oberfläche. Eine zweite Möglichkeit, die häufig bei Versuchen benutzt wird, ist die Anhaftung mittels einer mit Unterdruck beaufschlagten Werkzeugplattform aus gesinterem Aluminium (z.B. Metapor) oder mit Ansauglöchern versehene Werkzeuge [94]. Dieses Lösungskonzept kollidiert mit der Anforderung, sowohl verfahrenstechnisch als auch wirtschaftlich eine Serientauglichkeit insbesondere für sehr große Bauteile zu gewährleisten. Die letzte genannte Variante lässt sich in erster Linie für ebene Platten einsetzen und ist zudem schwer für sehr große Platten anwendbar, da das Einbringen von Ansauglöchern in nicht-ebene Oberflächen sehr aufwendig und die erforderliche Pumpenleistung für große Bauteile sehr hoch sind. Hierbei werden Werkzeugplattformen benutzt, die deutlich größer sind als die geforderte Plattengröße des Laminats. Der Rand des Werkzeugs steht für den Verschnitt zur Verfügung und kann somit zum mechanischen Verkleben der ersten Lage z.B. mittels Schrauben benutzt werden [95].

Zur methodischen Lösung dieses Erstlagenproblems wurden daher unterschiedliche physikalische und chemische Bindungsarten zur Verbindung zweier fester Körper in gasförmiger Umgebung identifiziert [73]. Aus den Haftmechanismen wurden verschiedene Lösungsvorschläge erarbeitet und hinsichtlich ihrer Prozesstauglichkeit bewertet. Basierend auf Untersuchungen zu den verschiedenen Lösungsmöglichkeiten stellten sich die Lösungskonzepte „Elektrische Leiter“ und „Adhäsive Kräfte“ als die am besten geeigneten heraus.

4.2.2 Erstlagenanhaftung mit Hilfe der Elektrostatik

Das Lösungskonzept basiert auf den Haftmechanismen der Elektrostatik. Die beiden dafür notwendigen Leiter werden durch die metallische Werkzeugplattform und eine leitende Faser oder ein leitendes Polymer gebildet (Bild 4.8).

Für den Tapelegeprozess ergibt sich folgende Analogie zum Plattenkondensator: Eine der Elektroden wird durch die metallische Werkzeugplattform gebildet. Durch den hohen Volumenanteil an elektrisch leitenden Kohlenstofffasern können diese als Gegenelektrode des Plattenkondensators verwendet werden. Infolge der angelegten Spannung kommt es zur Ausbildung eines elektrischen Feldes zwischen metallischer Werkzeugplattform und Kohlenstofffasern. Die Isolationsschicht auf der Platte verhindert einen Ausgleich der Ladungen, wodurch es zu Anziehungskräften zwischen der Platte und dem abgelegten Laminat kommt. Die Werkzeugplattform und das Tape werden dabei als homogen leitende Platten betrachtet, die durch die Spannung U auf die Ladung Q aufgeladen werden.

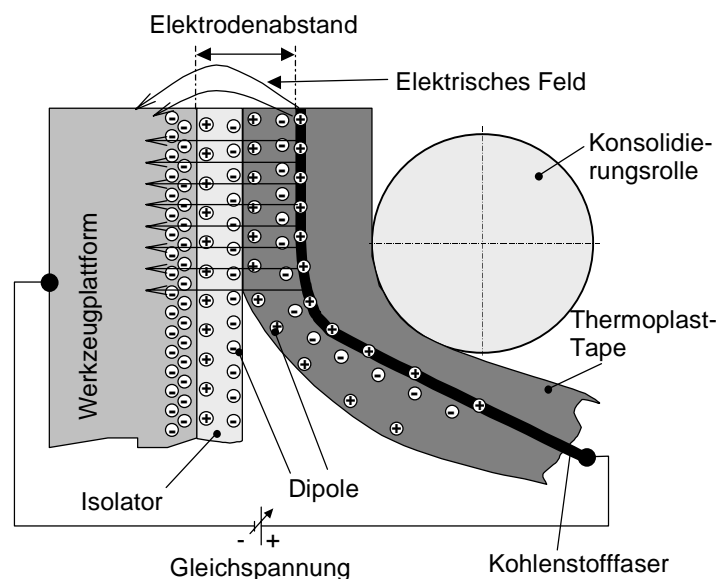


Bild 4.8: Ausrichtung der Ladungen/Dipole im elektrischen Feld

Vorteilhaft an diesem Verfahren ist, dass das Tape ohne Arbeitsvorbereitungen auf der Plattform abgelegt werden kann. Die erreichbare Normalkraftwirkung ist abhängig von der Dielektrizitätszahl der Isolationsschicht und der Schichtdicke bzw. der Durchschlagsfestigkeit. Die übertragbaren Scherkräfte ergeben sich aus der erreichten Normalkraft und dem Haftreibungskoeffizienten zwischen den beiden Flächen. Nach Wegnahme der Spannung und Entladung des Laminats lässt sich dieses ein-

fach von der Plattform lösen. Eine anschließende Reinigung der Form und der Bauteile ist nicht zwingend erforderlich. Das vorgestellte Konzept wurde patentiert [96]. Die Größe der Anziehungskraft F zwischen den beiden Platten errechnet sich unter Annahme eines homogenen elektrostatischen Feldes nach folgender Formel:

Gleichung 4.3: Kraftwirkung F zwischen zwei aufgeladenen Kondensatorplatten [97]

$$F = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot U^2}{2 \cdot d_i^2} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot E_D^2}{2}$$

Die erreichbare Kraft wird begrenzt durch das Isoliervermögen der Dielektrika. Die Spannung U_D , bei der eine Isolierschicht der Dicke d_i , der elektrischen Beanspruchung nicht mehr stand hält, wird als Durchschlagfestigkeit E_D bezeichnet. Wird diese Grenze überschritten, so findet ein Ladungsaustausch zwischen Plattform und abgelegtem Tape statt und es kommt zum Verlust der Kraftwirkung. Ist der Abstand der Platten durch die Dicke der Isolierung bestimmt, so entspricht d_i dem Abstand der Platten. Es ist ersichtlich, dass die maximal erreichbare Kraft zwischen zwei Kondensatorplatten direkt von der Durchschlagfestigkeit des verwendeten Dielektrikums abhängt. Bei der Verwendung von faserverstärkten Thermoplast-Tapes befindet sich durch die Matrix ein weiterer Isolator im elektrischen Feld. Da die Fasern in der Matrix nicht homogen verteilt sind, lässt sich der aus dem Isolator und der Matrix resultierende Elektrodenabstand nicht immer einfach bestimmen, wodurch die rechnerische Betrachtung der Kraftwirkung einer experimentellen Überprüfung bedarf.

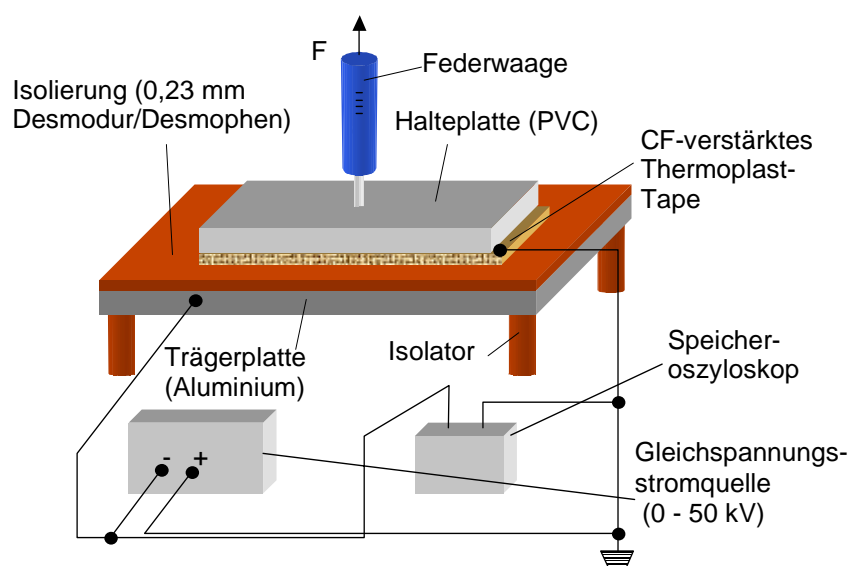


Bild 4.9: Versuchsaufbau zur Messung der Kräfte zwischen aufgeladenen Kondensatorplatten

Um die theoretischen Kräfte zwischen zwei Kondensatorplatten mit den tatsächlich auftretenden Kräften vergleichen zu können, wurde ein Versuchsstand gemäß Bild 4.9 aufgebaut. Als Spannungsquelle dient ein Hochspannungsnetzgerät, welches Spannungen zwischen 0 und 50 kV bereitstellen kann. Zur Messung der angelegten Spannung an den Kondensatorplatten, ist ein digitales Speicheroszilloskop in den Stromkreislauf geschaltet. Zum Aufnehmen der auftretenden Kräfte dient eine Federwaage. Nach dem Einstellen der gewünschten Spannung wurden jeweils 10 Messungen mit der Federwaage durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt.

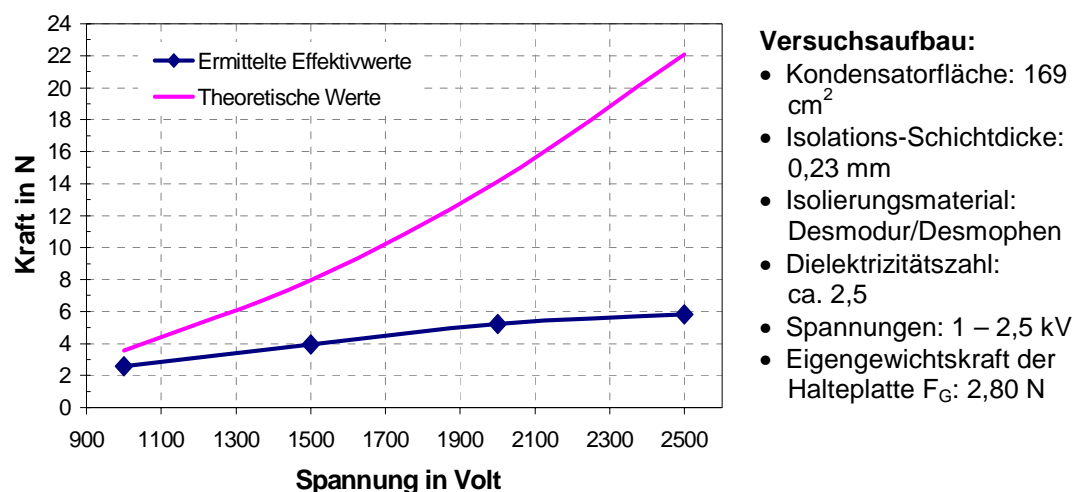


Bild 4.10: Normalkraftverlauf zwischen zwei Kondensatorplatten in Abhängigkeit von der angelegten Spannung

Die aus 10 Messungen gewonnenen Ergebnisse sind in Bild 4.10 vergleichend mit den unter Verwendung der Gleichung 4.3 berechneten Werten dargestellt. Ein Grund für den abweichenden Verlauf der Versuchsergebnisse ist der mangelhafte Kontakt des faserverstärkten Thermoplast-Tapes mit der Trägerplatte durch Verzug der Platte von 1,5 mm in der Diagonalen. Grund für diesen Verzug ist eine ungleichmäßige Erwärmung der Plattform während des Beschichtungsvorganges. Ein weiterer Grund für die Abweichung der Effektivwerte von den theoretischen Werten liegt in dem undefinierten Elektrodenabstand. Die Fasern sind über den Tape-Querschnitt verteilt und ermöglichen somit nur die Annahme eines durchschnittlichen Abstandes der Fasern bzw. Schichtdicke der Matrix. Der gemessene Effektivwert bei 2,5 kV entspricht einer flächenbezogenen Anzugskraft von 3,55 N/mm². Die Gewichtskraft durch das Tape entspricht bei CF/PEEK aber nur 0,0223 N/mm². Dies bedeutet, dass alleine

die Anhaftungskraft der ersten Lage ausreicht, um etwa 159 Lagen bzw. ein 2 cm dickes Laminat zu halten.

Dennoch muss die Anhaftung auf Basis der bisherigen Versuche als vergleichsweise gering eingestuft werden. Es ist davon auszugehen, dass ohne entsprechende Werkzeugtemperierung ein Verzug des Bauteils aufgrund von Eigenspannungen zu einer Ablösung des Laminats führt. Zudem ist zu beachten, dass beim Ablegen hauptsächlich Scherkräfte in der Grenzfläche auftreten. Ein derartiger Versuch konnte aber bisher noch nicht durchgeführt werden, da hierzu ein umfangreicher anlagentechnischer Umbau erforderlich ist.

Aus den im Versuch gewonnenen Erkenntnissen zur Verarbeitung von CF/PEEK und den Anforderungen an die Werkzeugplattform werden im folgenden die Anforderungen an eine Beschichtung der Werkzeugoberfläche hier definiert mit: Temperaturbeständigkeit bis 350 °C, Durchschlagfestigkeit > 10 kV/mm, Dielektrizitätskonstante ca. 5, definierte Isolator-Schichtdicke von 0,3 mm, Oberflächenrauigkeit $R_a \leq 2 \mu\text{m}$. Um die Anforderungen an die Beschichtung zu überprüfen, wurden metallische Probenplatten beschichtet und auf ihre Verwendungsfähigkeit hin untersucht. Am geeignetsten erschien eine im Plasmaspritzverfahren aufgebrachte Beschichtung aus Aluminiumoxid (Al_2O_3). Die Vor- und Nachteile des Lösungskonzeptes auf Basis der Elektrostatik sind zusammenfassend in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Vor- und Nachteile des Lösungskonzeptes „Elektrostatik“

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Größerer Spielraum in der WZ-Temperierung • Keine Vorbehandlung des WZ • Keine Kontaminationsgefahr des Laminats • Leichte Berechnung eines Näherungswertes für die Anhaftungskraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahr für das Personal/die Anlage • Beschränkt auf leitende Fasern/Polymere • Anhaftung ist abhängig von Oberflächenrauigkeit und Faser-/Matrixverteilung • Starker Eingriff in die Anlagentechnik • Vergleichsweise schwache Anhaftung

4.2.3 Erstlagenanhaftung mit Hilfe der Adhäsion

Das zweite Konzept zur Lösung des Erstlagenproblems basiert auf der Ausnutzung der adhäsiven Kräfte zwischen der Werkzeugplattform und der thermoplastischen Matrix des Tapes. Unter Adhäsion versteht man „den Zusammenhang zwischen den Molekülen zweier Körper, hervorgerufen durch gegenseitige Anziehung“ [98]. Bezogen auf das Erstlagenproblem bedeutet dies eine temporäre Verklebung des Tapes

mit der metallischen Werkzeugplattform und anschließend induzierter Dehäsion. Um den zu Grunde liegenden Mechanismus besser zu verstehen, sind die physikalischen Prozesse des Klebens näher zu betrachten. Die Voraussetzungen für ausreichende Adhäsionskräfte sind das Vorhandensein von Atomgruppierungen mit polaren Eigenschaften sowie ihre gegenseitige Zuordnung innerhalb eines Moleküls. Diese Kräfte haben mit $0,1 - 1 \text{ nm}$ nur eine sehr geringe Reichweite, weshalb die Benetzung des Fügeteils mit einem Klebstoff von zentraler Bedeutung ist. Die Benetzbarkeit einer Oberfläche ist abhängig von deren Oberflächenspannung und der Oberflächenspannung der benetzenden Substanz.

Ist die Oberfläche eines Fügeteils ausreichend benetzt, dominieren physikalische und chemische Wechselwirkungen zur Ausbildung der Adhäsionskräfte. Die früher häufig angenommene Mikroverzahnung ist für Metallklebungen nicht mehr aufrechterhalten und spielt nur bei porösen Fügeteilen eine Rolle [99]. Die Adhäsionskräfte beruhen im wesentlichen auf den zwischenmolekularen Kräften, welche auf der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen den polaren Gruppen basieren und in der sechsten Potenz mit der Entfernung sowie mit steigender Temperatur abnehmen. Die Bindungsenergien polarer Gruppen betragen $50 - 60 \text{ kJ/mol}$. Während z.B. Kohlenwasserstoffe unpolar sind, finden sich negative Dipole in Estern, Ketonen und Ethern. Metalle sind zwar unpolar aber stark (positiv) polarisierbar [100]. Gemäß des vorliegenden Problems handelt es sich um den Auftrag eines Schmelzklebstoffs (Thermoplast) auf eine metallische Werkzeugplattform (Bild 4.11).

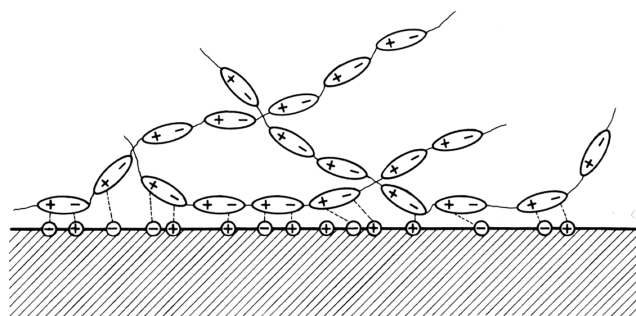


Bild 4.11: Ausbildung von Adhäsionskräften in folge von Dipolwirkungen [100]

Ein Schmelzklebstoff ist ein thermoplastischer Kunststoff, der schmelzflüssig appliziert wird, physikalisch abbindet und lösungsmittelfrei vorliegt. Hinsichtlich der Erstarrung bestehen zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten grundsätzliche Unterschiede. Während bei der Abkühlung amorpher Thermoplaste die maximalen

Adhäsionskräfte bei der Glasübergangstemperatur ihr Maximum erreichen, ist die Bildung der adhäsiven Kräfte bei teilkristallinen Thermoplasten mit der Kristallisationstemperatur beendet. Bei der Abkühlung sinkt die Beweglichkeit der Moleküle bzw. deren Seitenarme und das Volumen. Die Thermodynamik der Moleküle bzw. Seitenarme reicht dann nicht mehr aus, um die sich ausbildenden adhäsiven Kräfte wieder zu trennen, wie es noch bei höheren Temperaturen der Fall ist.

Ziel des Thermoplast-Tapelegeprozesses ist jedoch nicht eine bleibende Anhaftung des Laminats auf der metallischen Werkzeugplattform, sondern das problemlose Ablösen ohne Laminatschädigung am Prozessende. Die Problemlösung basiert daher entsprechend der vorgestellten Theorie auf folgendem Ansatz: Das Thermoplast-Tape ist zwecks ausreichender Benetzbarkeit schmelzflüssig auf die Werkzeugoberfläche abzulegen. Die adhäsiven Kräfte bilden sich aus und erreichen durch entsprechende Werkzeugtemperierung schnell ihr Maximum. Die Dehäsion wird durch thermische Schubspannungen beim Abkühlen in die Grenzfläche zwischen Werkzeug und Laminat eingeleitet.

Demnach besitzt die Temperierung des Werkzeugs die maßgebliche Rolle. Versuche mit CF/PEEK Tapes haben gezeigt, dass die Benetzung der Werkzeugoberfläche bei einer Werkzeugtemperierung nahe der Schmelztemperatur zu einer zu hohen Benetzung (Kontaktfläche) und somit zu einer zu starken Anhaftung führt, um das Laminat wieder beschädigungsfrei abzulösen. Daher wurde zusätzlich ein Trennmittel eingesetzt, um die adhäsiven Kräfte zu reduzieren. Weiterhin zeigt sich, dass bei zu hoher Werkzeugtemperatur zwar eine Anhaftung erfolgt, jedoch die Matrix immer noch zu weich ist, so dass sich das Laminat beim Ablegen weiterer Lagen in Folge von Schubspannungen löst. Demgegenüber findet bei zu niedrigen Werkzeugtemperaturen trotz Aufschmelzen des Tapes keine für den Fertigungsprozess ausreichende Anhaftung statt. Im Rahmen zahlreicher Versuche wurde als geeignete Werkzeugtemperatur eine Temperatur nahe der Kristallisationstemperatur des teilkristallinen Matrixwerkstoffs identifiziert [101]. Diese These wurde für CF/PPS und GF/PP Tapes durch weitere Versuche bestätigt.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse wurde ein Versuchsträger mit einer konkav-konvexen Geometrie (S-Schlag) aufgebaut (Bild 4.12a) und erste Ablegeversuche durchgeführt (Bild 4.12b). Wie die Schliffbilder in Bild 4.12c zeigen, konnten unidirek-

tionale Laminats mit wenig Lunkern und guter Konsolidierung hergestellt werden. Die Oberflächenrauigkeit des Laminats auf der Werkzeugeite beträgt $1,32 \mu\text{m}$ [102].

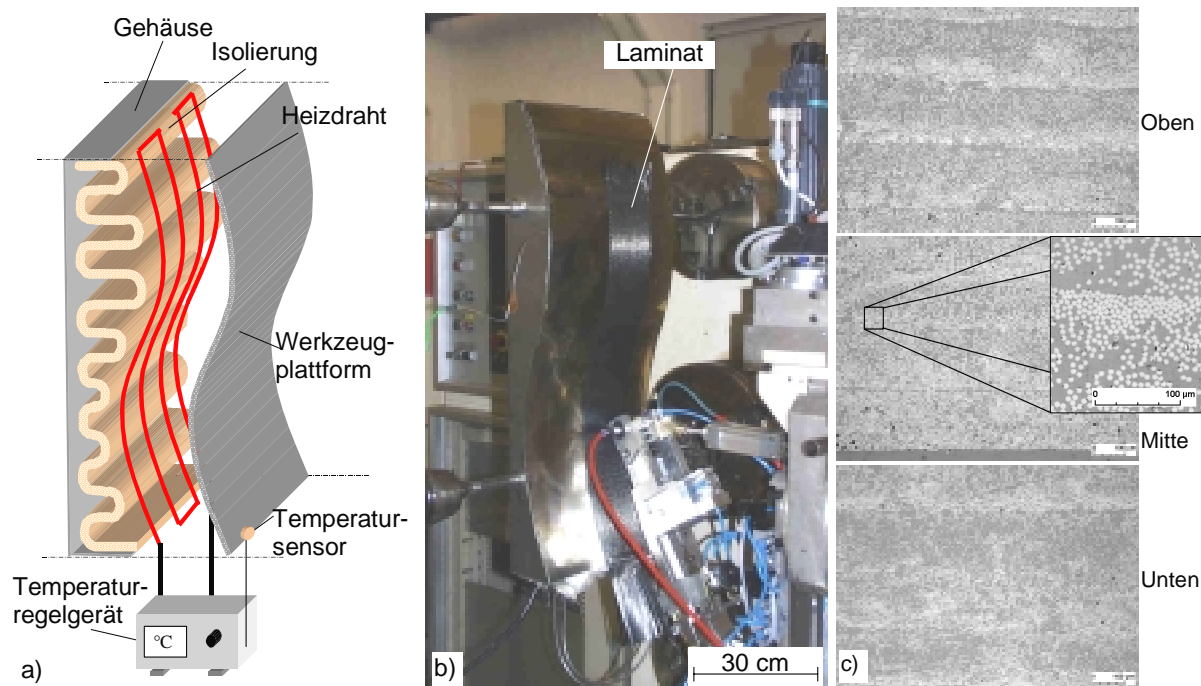


Bild 4.12: Aufbau des Versuchsträgers a), Herstellung des S-Schlags b) und Schliffbilder c)

Bei einem Verbleib des Trennmittels auf der Laminatoberfläche können nachgeschaltete Fertigungsprozesse wie z.B. die Lackierung negativ beeinträchtigt werden, so dass eine Reinigung der Oberfläche erforderlich wäre. Zur Klärung der Frage wurden Messungen mit der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) für folgende Proben durchgeführt:

- Probe 1: Ein Aluminiumblech mit aufgetragenem Trennmittel.
- Probe 2: Ein Aluminiumblech mit aufgetragenem Trennmittel, das mit Aceton wieder entfernt wurde.
- Probe 3: Ein Aluminiumblech mit aufgetragenem Trennmittel, auf dem Tapes entsprechend des Konzepts abgelegt und anschließend wieder gelöst wurden.
- Probe 4: Das von dem Aluminiumblech (Probe 3) gelöste Laminat (WZ-Seite).
- Probe 5: Das von dem Aluminiumblech (Probe 3) gelöste Laminat (Oberseite).
- Probe 6: Reines Trennmittel, als Referenzprobe.

Die FTIR Untersuchungen zeigen, dass das Trennmittel auf der Aluminium-Oberfläche nachgewiesen werden kann⁴. Auf der Probe 2 sind die Schwingungsbanden praktisch nicht in ihrer Intensität geschwächt, so dass davon auszugehen ist, dass eine mit Trennmittel versehene Werkzeugoberfläche aufwendig gereinigt werden muss (Anhang B). Die Intensitätsunterschiede zwischen den Oberflächen mit Trennmittelauftrag und den Trennmittel selbst ist auf Konzentrationsunterschiede zurückzuführen. Probe 3 zeigt die Schwingungsbanden des Trennmittels mit nahezu gleicher Intensität. Die leichte Intensitätserhöhung ist evtl. auf leichte Rückstände des Laminats zurückzuführen (Anhang C). Anhang D zeigt die Ober- und Unterseite des zuvor abgelegten und gelösten Laminats (Probe 4 und 5) im Vergleich zu den Trennmittel-Schwingungsbanden. Danach scheint das Laminat durch das Trennmittel auf Basis der FTIR-Analyse nicht nachweisbar kontaminiert. Auch wenn die Intensität der Schwingungsbanden gleich ist, können trotzdem ein paar Monolagen von Trennmittelmolekülen vorhanden sein. Daher sind weitere Untersuchungen mit Oberflächen sensitiven Analyseverfahren nötig.

Für amorphe Matrices wurden zusätzliche Experimente mit CF/PEI auf dem Plattenwerkzeug durchgeführt. Da es hier keine Kristallisationstemperatur gibt, wurde entsprechend der oben beschriebenen Theorie die Glasübergangstemperatur gewählt (für CF/PEI 210 °C). Diese entspricht bei den amorphen Thermoplasten analog zu den teilkristallinen Thermoplasten dem Punkt, an dem die maximalen Anhaftungskräfte an einer Grenzfläche gebildet werden. Als Ergebnis der Versuche zeigt sich, dass sich die Erkenntnisse vollständig von den teilkristallinen auf die amorphen Thermoplaste übertragen lassen. Die Tapes haften sehr gut auf der WZ-Oberfläche an und lösen sich nahe der Raumtemperatur wieder ab. Hier scheint sogar der Einsatz des Trennmittels nicht unbedingt erforderlich.

Im Rahmen spezieller Untersuchungen wurden mehrere plattenförmige Bauteile mit den Maßen 600 x 600 x 5 mm³ aus CF/PEEK und CF/PPS hergestellt. Die Halbzeuge wurden als 36-lagiges Laminat [+45/0/-45/0/90/0/-45/0/45]_{2S} mit Geschwindigkeiten zwischen 4 und 8 m/min abgelegt. Die Halbzeuge besitzen eine Breite von 12,7 mm bzw. 12 mm. Auch längere Fertigungsunterbrechungen (Schichtwechsel) führten zu keinerlei Maschinen- oder Steuerungsfehlern. Während der gesamten Ferti-

⁴ Als relevanter Bereich des gesamten Spektrums sind nur die Schwingungsbanden zwischen 1550 und 550 1/cm dargestellt.

gungsdauer haftete das Laminat auf dem Werkzeug an und löste sich wieder problemlos ab. Damit kann die Tauglichkeit des Lösungsansatzes für lange Prozesse in der Serienfertigung gezeigt werden [103]. Zur Aufheizung wurden Heizelemente mit einer maximalen Leistung von 2 kW verwendet. Für eine spätere industrielle Fertigung großer Bauteile ist daher von 5,6 kW/m² auszugehen. Der Wert lässt sich aber weiter durch effizientere Aufheizgeräte senken, zumal nicht fortwährend geheizt wurde. Die Vor- und Nachteile des vorgestellten Konzepts zur Lösung der Erstlagenproblematik durch Adhäsion sind zusammenfassend in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Vor- und Nachteile des Lösungskonzeptes „Adhäsion“

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Nur geringe Gefahr für das Personal • Freie Materialkombination • WZ-Temperierung unterstützt Laminatqualität • Wenig Eigenspannungen • Einfache Anpassung der Anlagentechnik • Stärkere Anhaftung als beim Lösungskonzept „Elektrostatik“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Spielraum in der WZ-Temperierung • Vorbehandlung des WZ • Kontaminationsgefahr des Laminats • Schwierige Berechnung der theoretischen Anhaftungskraft

4.3 Temperaturführung

4.3.1 Analyse des Brennflecks bei der Flammheizung

Am IVW wird zur Aufheizung der Tapes eine Wasserstoff-/Sauerstoffflamme eingesetzt. Wie Tabelle 4.6 gegenüber den anderen eingesetzten Aufheizsystemen zeigt, besitzt die Flammheizung die Vorteile, dass sie komplett materialunabhängig und leicht in einen Prozess integrierbar eingesetzt werden kann. Der hohe Aufwand zur Ermittlung materialspezifischer Absorptionsspektren entfällt und der geringe Bau- raum erleichtert die Konstruktion eines möglichst kleinen Tapelegekopfes. Die Flammheizung wird durch ihre Flexibilität dem derzeitigen Entwicklungsstand des Thermoplast-Tapelegeprozesses insgesamt gerecht, da die Prozessentwicklung nicht stark durch Probleme wie Fokussierung, ausreichende Energie zur material-spezifischen Aufschmelzung und Integration in den TLK aufgehalten wird.

Nachteilig ist jedoch die schwierige Steuerung des Aufheizprozesses. Die nicht-adiabatische Verbrennung ist ein komplexer Prozess. Sie lässt sich aufgrund der hohen Temperatur von 2086 °C (für $\lambda = 1$) [104] und der Transparenz des

Tabelle 4.6: Vor- und Nachteile möglicher Aufheizsystemen für das Thermoplast-Tapelegen

Aufheizsystem	Vorteile	Nachteile
Diodenlaser	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtbarer Strahlfleck • Hohe Wärmestromdichte • Sehr geringe Ansprechzeiten • Berührungslose Energieeinkopplung und Volumenabsorption 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Anschaffungs- und Betriebskosten • Hoher Steuerungsaufwand • Stark materialabhängige Absorption • Sehr großer Bauraum
Nd:YAG-Laser	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlführung über Lichtleitfasern • Hohe Wärmestromdichten • Sehr geringe Ansprechzeiten • Berührungslose Energieeinkopplung und Volumenabsorption 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Anschaffungs- und Betriebskosten • Hoher Steuerungsaufwand • Stark materialabhängige Absorption • Großer Bauraum
Flamme (H_2/O_2)	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Anschaffungskosten • Geringer Bauraum • Hohe Erfahrungswerte • Materialunabhängiger Einsatz • Hohe Wärmestromdichte • Sehr robustes System 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeinkopplung hauptsächlich über Wärmeleitung • Oxidationswirkung wahrscheinlicher • Schwierige Steuerung • Großflächige Erwärmung
Heißgas	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Anschaffungskosten • Gute Handhabung • Hohe Erfahrungswerte 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingeschränkte Wärmestromdichte • Energieeinkopplung über Wärmeleitung • Lange Ansprechzeiten
Infrarot	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Anschaffungskosten • Geringer Energieverbrauch • Hohe Erfahrungswerte • Berührungslose Energieeinkopplung 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wärmestromdichten • Materialabhängige Absorption • Großer Bauraum

Verbrennungsgases nicht mit Thermoelementen oder Pyrometern messen und somit nur indirekt steuern.

In einem ersten Versuch sollte die Steuerbarkeit des Energieeintrags der Flamme untersucht werden. Dazu wurde eine Halterung konstruiert, auf der die Flamme auf drei Thermoelemente (Typ K) einstrahlen kann (Bild 4.13). Zusätzlich zum Abstand und Winkel wurden die Zusammensetzung und der Volumenstrom geändert. Die Aufheizung erfolgt nur kurzzeitig bis 450 °C, um ein Verbrennen der Thermoelemente zu vermeiden. Gemessen wird dabei die Aufheizrate in °C/s als vergleichender Wert für die Flammeinstellung. Bei den Versuchen zeigt sich an der deutlich geringeren Aufheizung der außermittigen Thermoelemente, dass sich die Flamme entgegen der allgemeinen Annahmen gut fokussieren lässt. Die besten Ergebnisse hinsichtlich einer stetigen Veränderung der Brennerflamme ergeben sich bei einer Brenngas-Zusammensetzung von 9:1 (H_2/O_2). Bleibt dieser Prozessparameter konstant, lässt sich die Aufheizrate durch Veränderung des Volumenstroms (und des Brennerabstands) zwischen 200 °C/s und 2000 °C/s in Stufen von etwa 60 °C/s regeln.

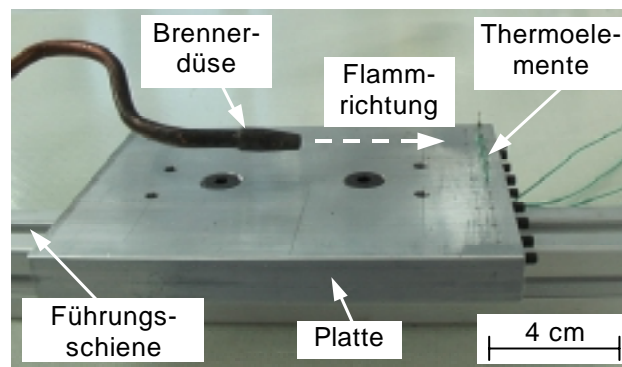


Bild 4.13: Versuchsaufbau zur Messung der Aufheizrate

In einem weiteren Versuch sollte der Flammkegel mit Hilfe einer Thermokamera näher untersucht werden. Dabei wurden thermographische Aufnahmen sowohl in horizontaler Arbeitsebene als auch in vertikaler Arbeitsebene mit dem Tapelegekopf durchgeführt. Für die Aufnahmen wurden wie im zuvor beschriebenen Versuch die Flammzusammensetzung, der Volumenstrom, der Abstand und Winkel verändert.

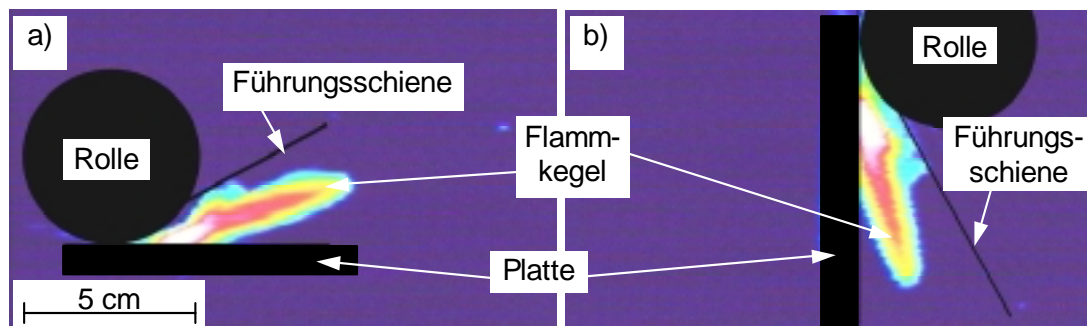


Bild 4.14: Thermographiebilder für die horizontale a) und vertikale Arbeitsebene b)

So ergaben sich unterschiedlich ausgeprägte Aufheizzonen und Flammkegelgrößen (Bild 4.14). Bei der horizontalen Arbeitsebene zeigte sich, dass bei konstantem Brennerabstand praktisch nur der Einfallswinkel zwischen Brennerdüse und Werkzeugoberfläche einen Einfluss auf die Größe des Flammkegels hat. Je kleiner der Einfallswinkel ist, desto kleiner wird der Einfluss von Volumenstrom und Flammzusammensetzung. Dagegen steigt der Einfluss aller Parameter mit dem Abstand der Brennerflamme von der Konsolidierungsrolle. Bei großen Abständen von 79 mm bleibt die nach den Thermographiebildern messbare Aufheizlänge für das Tape trotz unterschiedlichem Einfallswinkel ($10 - 40^\circ$) gleich, was an dem strömungstechnischen Rückstau der Flammfront an der Konsolidierungsrolle und dem Tapeführungs-

kanal liegt. Die Aufheizlänge des Laminats nimmt unabhängig vom Abstand mit dem Einfallswinkel zu. Zudem sind beide Aufheizlängen nahezu unabhängig von Volumenstrom und Zusammensetzung. Bei gleichen Einstellungen ist der Flammkegel bei vertikaler Arbeitsebene aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeit größer. In beiden Arbeitsebenen bildet sich jeweils bei der Winkelhalbierenden zwischen Tapeeinlauf und Werkzeugoberfläche der größte Flammkegel aus. So lässt sich abschließend festhalten, dass sich die Flamme in vertikaler Richtung besser steuern lässt und der größere Flammkegel erzeugt werden kann. Die Abhängigkeit dieser Aufheizmethode von dem Strömungsverhalten des Gases stellt insofern einen Nachteil dar. Bisher sind nur qualitative Beschreibungen der Aufheizflächen und -längen möglich. Zukünftig sind zur besseren Beschreibung/Regelung der Flamme Modelle und erweiterte Messverfahren erforderlich.

4.3.2 Temperierung der Konsolidierungsrolle

Die Konsolidierungsrolle bewirkt beim Abrollen, dass sich die aufgeschmolzenen Matrix-Oberflächen annähern, eine gemeinsame Oberfläche ausbilden, die Polymerdiffusion und schließlich die Konsolidierung unter Wärmeabfuhr erfolgen kann. Obwohl die Verweildauer des Längeninkrements des Tapes unter der Konsolidierungsrolle nur sehr kurz ist (ca. 0,1 s), hat neben dem Anpressdruck die Rollentemperatur eine große Bedeutung für die Konsolidierungsqualität. Der Rolle wird während des Ablegens durch das erwärmte Laminat und durch die Aufheizquelle ständig Wärme zugeführt. Gleichzeitig kühlt sie nach dem Absetzen wieder ab, so dass sich ohne Temperierungsvorrichtung keine konstante Rollentemperatur einstellen kann. Eine zu warme Rolle hat sowohl einen schlechten Einfluss auf die Konsolidierung als auch auf die Laminatoberfläche. Bild 4.15a zeigt Matrixausrisse auf der Laminatoberfläche in Folge von Matrixanhaftungen an einer zu warmen Rolle. Das Anhaften der Matrix an der Rolle konnte selbst durch den Einsatz eines Trennmittels nicht dauerhaft eliminiert werden. Durch die Anhaftung wird zusätzlich eine Zugkraft senkrecht zur Oberfläche eingebracht, die der Konsolidierung entgegenwirkt.

Auf Basis der Prozessbedingungen scheint daher eine Temperierung der Konsolidierungsrolle unumgänglich. Die Erweiterung des Tapelegekopfes um eine mit Wasser temperierte Konsolidierungsrolle ergab, dass eine reine Kühlung, auf etwa Raum-

temperatur, nicht ausreicht. Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass eine zu kühle Rolle eine schlechte Konsolidierung bewirkt oder sie gar verhindert. Dem schmelzflüssigen Tape wird in diesem Fall die Wärme zu rasch entzogen, so dass die Matrix vorzeitig ohne ausreichende Konsolidierung einfriert. Weiterhin wurde im Falle der H_2/O_2 -Flammheizung und einer zu kühlen Rolle (20 °C für GF/PP) eine starke Kondenswasserbildung auf der Rollenoberfläche beobachtet. Das Kondenswasser gelangt während des Ablegevorgangs in die schmelzflüssige Matrixoberfläche und hinterlässt beim gasförmigen Austritt einen Krater (Bild 4.15b).

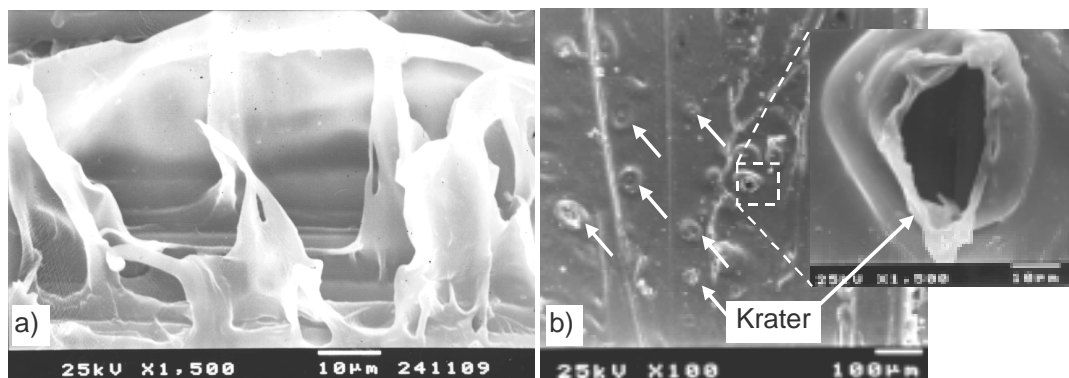


Bild 4.15: Matrixausrisse auf der Laminatoberfläche durch zu warme Konsolidierungsrolle a) und Kraterbildung durch eingeschlossenes Kondenswasser b)

Gute Konsolidierungsqualitäten wurden z.B. für CF/PEEK mit einer Rollentemperatur von 90 °C erreicht. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass ein hoher Volumenstrom des Temperiermediums erforderlich ist, um die Rollentemperatur trotz der Wärmeeinwirkung konstant zu halten.

4.3.3 Temperierung der Werkzeugplattform

Die Temperierung der Werkzeugplattform nimmt in sofern eine Sonderrolle ein, als dass sie auf der einen Seite die Basis zur Lösung des Erstlagenproblems darstellt (Kapitel 4.2.3) und auf der anderen Seite, wie bei allen Thermoplast-Verarbeitungsverfahren, maßgeblich die Ausbildung von Eigenspannungen und den Kristallisationsgrad des Bauteils beeinflusst. Aufgrund des Lösungskonzepts zum Erstlagenproblem ist die Werkzeug- und somit die Bauteiltemperierung auf die Kristallisationstemperatur der Matrix festgelegt und kann nur geringfügig variiert werden.

Die Versuche haben aber gezeigt, dass die Bauteiltemperierung alleine nicht ausreicht, um Eigenspannungen zu vermeiden.

Noch während des Ablegeprozesses zeigt sich mangels adhäsiver Kräfte bei zu geringer Laminattemperatur ein vorzeitiges Ablösen des Laminats an den Randzonen. Die ungewollte Abkühlung erfolgt trotz fortwährender Werkzeugtemperierung durch zu lange, abstehende Tapeenden, da aufgrund der vorliegenden Technik das Tape noch nicht konturgenau abgeschnitten werden kann (Bild 4.16). Diese hochstehenden Enden wirken quasi als „Kühlrippen“ und führen zu einer starken Absenkung der Laminattemperatur in den Randbereichen, so dass es sukzessive zu einer fortschreitenden Ablösung des Laminats von außen nach innen kommt.

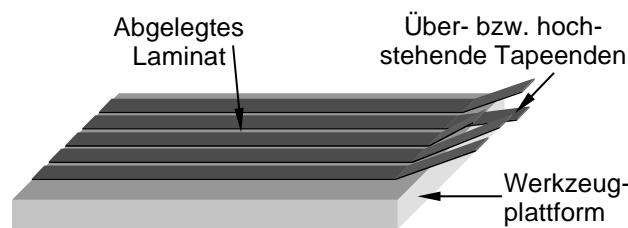


Bild 4.16: Abkühlung des Laminats durch überstehende Tapes an den Bahnenenden

Des Weiteren treten während des Abkühlvorgangs am Prozessende trotz der Werkzeugtemperierung größere Eigenspannungen auf, die zu einer Verformung des Laminats führen. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Temperaturen auf Laminatoberseite und -unterseite. Der Unterschied beträgt z.B. für das 36-lagige Laminat aus CF/PEEK etwa 20 % [103]. Diesem Effekt wird durch eine Abdeckung zur Homogenisierung der Laminattemperatur vor dem Abkühlen und zum anschließenden gleichmäßigen Herunterkühlen entgegengewirkt und somit die sichtbaren Eigenspannungen eliminiert. Die zur Beeinflussbarkeit der Kristallinität des Laminats durchgeführten Untersuchungen mit unterschiedlichen Abkühlraten zeigen, dass der Bauteil-Kristallinitätsgrad in Folge der relativ hohen Verweilzeit auf dem temperierten Werkzeug nahezu unabhängig von der Abkühlrate ist. Das bedeutet, dass die Fertigungsdauer für eine vollständige Kristallisation ausreicht [105].

4.4 Ablegeverhalten faserverstärkter Thermoplast-Tapes

4.4.1 Defizite bei der Konsolidierung

Bei der Fertigung der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Platten aus CF/PEEK und CF/PPS konnten im Rahmen einer mikroskopischen Analyse neue Erkenntnisse zum Konsolidierungsverhalten dieser Halbzeuge mit Faservolumengehalten von 61 % bzw. 60 % erzielt werden. In Bild 4.17 sind die unterschiedlichen Fehler einer Platte markiert. Sehr auffällig sind die zahlreichen Überlappungen (Fehler A), die zu einer lokalen Aufdickung und somit zu einer ungleichmäßigen Lagendicke führen. Frühere Versuche zur Herstellung des S-Schlags mit Halbzeugen mit 50 Fvol%. (Kapitel 4.2.3) zeigen, dass ein gewisses Maß an Überlappung im Bereich von 0,2 mm in Anbetracht der in Kapitel 4.1.2 gefundenen Unstetigkeiten der Tapeanten erforderlich ist, um eine gute seitliche Konsolidierung zu erzielen. Diese Erkenntnisse lassen sich nicht auf die Tapes mit höheren Faservolumengehalten übertragen, da sie geringere Fließeigenschaften in Querrichtung besitzen. Wie in dem Bild dargestellt, werden die Überlappungen besonders groß, wenn zwei gleichorientierte Lagen aufeinander liegen.

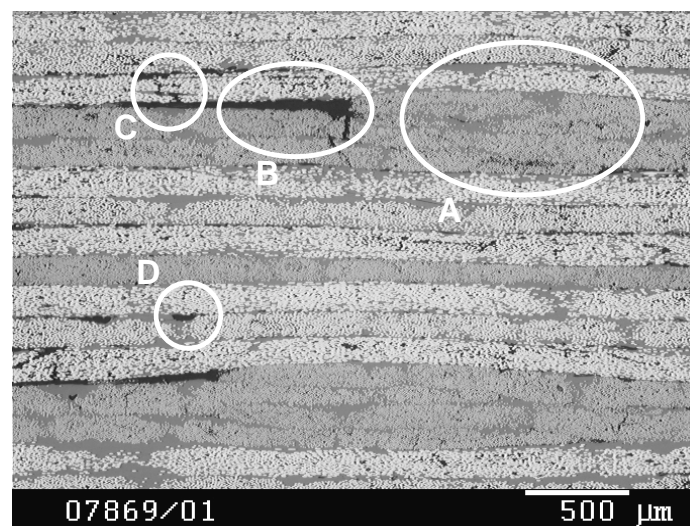


Bild 4.17: Schliffbild einer Platte aus CF/PEEK (61 Fvol%.)

Fehler B zeigt einen großen nicht konsolidierten Bereich. Diese „Luftkeile“ treten immer nur neben Überlappungen auf, so dass zu vermuten ist, dass das Material aufgrund des hohen Faservolumengehalts keine größeren Verformungen zulässt und

die lokalen Aufdickungen in folge der Überlappungen keine flächige Auflage der Konsolidierungsrolle erlauben.

Der hohe Faservolumengehalt bewirkt eine Art Abstützwirkung. Die Rolle verkantet und kann das Material auf der freischwebenden Seite mangels Anpressdruck nicht vollständig konsolidieren (Bild 4.18). Durch das Verkanten können vertikale Risse im Tape auftreten, da das Tape nicht flächig aufliegen kann (Fehler C).

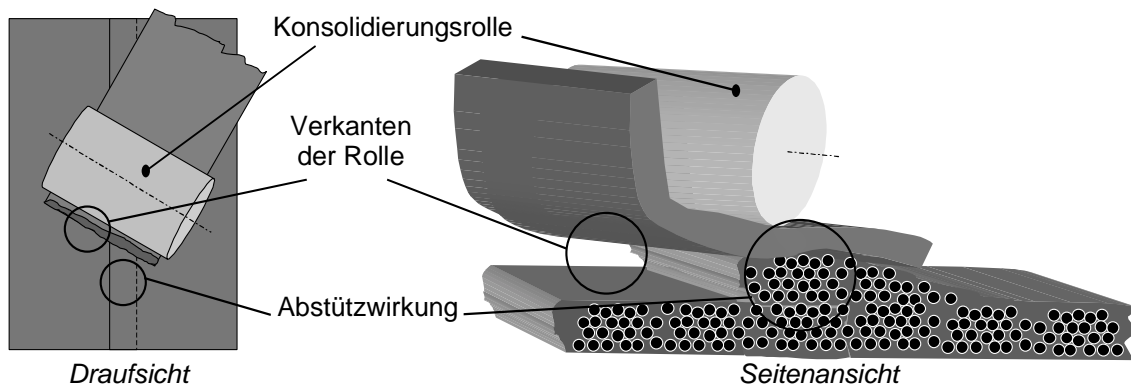


Bild 4.18: Bildung von Lunkern durch Verkanten der Konsolidierungsrolle an Überlappungen

Das Laminat zeigt darüber hinaus mehrere interlaminare Lunker (Fehler D). Diese entstehen bei Tapes mit variabler Dicke über die Breite (Bild 4.19). Auf die dünneren Bereiche kann kein ausreichender Konsolidierungsdruck appliziert werden, da die faserreichen Zonen eine Abstützwirkung hervorrufen.

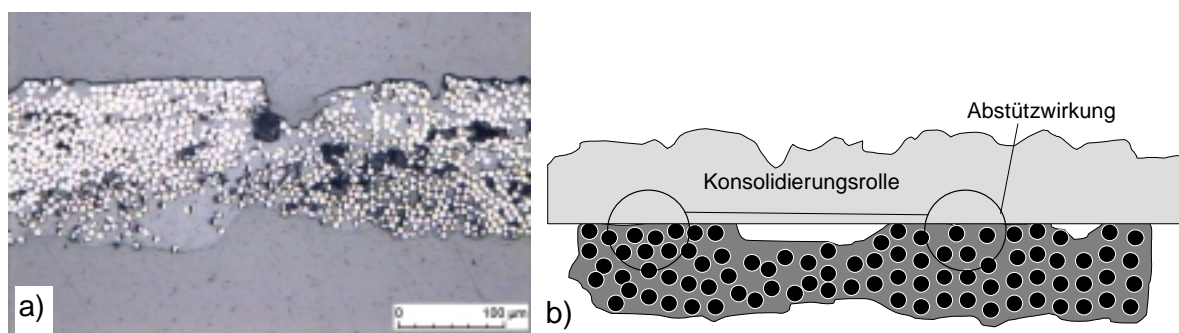


Bild 4.19: Beispiel eines Tapes mit schlechter Dickenkonstanz a) und die Probleme durch Abstützwirkung bei dessen Konsolidierung b)

Bild 4.20 zeigt das Schliiffbild einer weiteren Platte aus CF/PEEK. Im linken Bereich des Bildes besitzt die Platte eine bessere Konsolidierung durch eine bessere Homogenität und Geometrie-Konstanz der Tapes. Jedoch weisen die Kanten der Tapes

mitunter eine für die Verarbeitung ungünstige Geometrie „Verschmierung“ auf (siehe Kapitel 4.1.2). Dieser Kantentyp führt an den Stoßstellen zu einer mangelnden Verbindung, da keine gleichmäßige Lagendicke und ein entsprechender Konsolidierungsdruck über die gesamte Tapebreite ausgebildet werden kann. Dieser Effekt wird in [65] bestätigt.

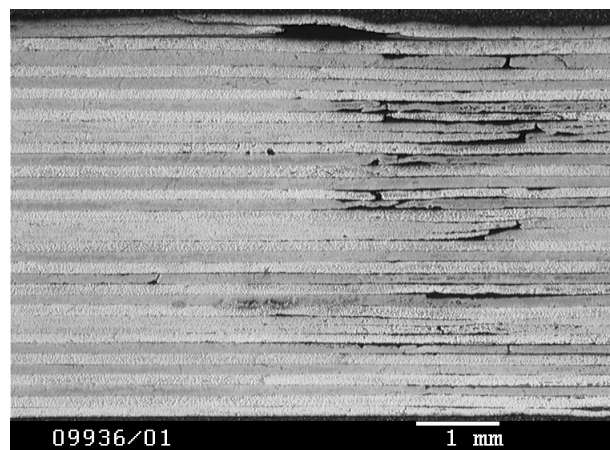


Bild 4.20: Schliffbild der Platte aus CF/PEEK (60 Fvol%).

Bild 4.21 zeigt das Schliffbild einer Platte aus CF/PPS. Der Verbund ist deutlich homogener und besitzt eine optisch bessere Konsolidierung. Dies zeigt, dass aufgrund der niedrigeren Schmelzviskosität von PPS im Vergleich zu PEEK geometrische Unstetigkeiten besser ausgeglichen werden können. Allerdings weist das Laminat zahlreiche kleine, inter- und intralaminare Lunker auf, die auf Halbzeug- und Prozesseinflüsse zurückzuführen sind.

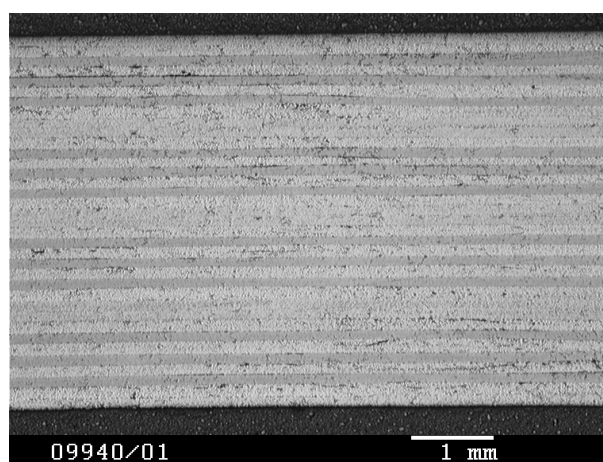


Bild 4.21: Schliffbild einer Platte aus CF/PPS (60 Fvol%).

Fazit: Die Ergebnisse verdeutlichen, wie stark der Einfluss der Halbzeuggeometrie auf die Konsolidierungsqualität ist. Während des Ablegevorgangs findet kaum ein Fließen der Matrix statt, so dass sich der Tapequerschnitt wenig verformt. Entsprechend stark wirken sich halbzeugimmanente Geometrieunstetigkeiten aus. Zu geringe Tapedicken und vom Rechteck abweichende Kantenformen führen zu Lunkern. Den gleichen Effekt haben zu starke Überlappungen, da sie insbesondere bei hohen Faservolumengehalten eine Abstützwirkung der Rolle bewirken und die Konsolidierung behindern. Die genannten Effekte verstärken sich mit zunehmendem Faservolumengehalt und steigender Schmelzviskosität.

4.4.2 Effekte beim Ablegen von gekrümmten Bahnen

Ein großer Vorteil des Tapelegeprozesses ist das Erzeugen von definierten Laminaten mit lokalen Verstärkungen oder Aussparungen. Der Ablegepfad wird dabei neben der Maschinenfunktionalität von der Drapierbarkeit des Thermoplast-Tapes begrenzt. Hierbei kann es insbesondere bei Ablegen von Kurven zu einer Faltenbildung auf der Kurveninnenseite des Tapes kommen (siehe Bild 4.22).

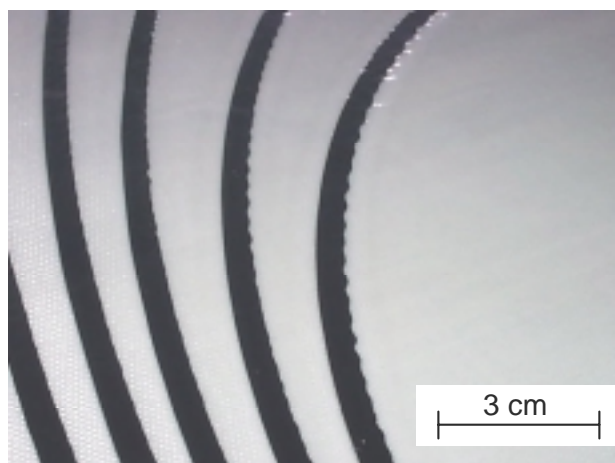


Bild 4.22: Ondulation auf der Kurveninnenseite

Ziel des Verfahrens ist das Ablegen der Thermoplast-Tapes ohne Fehlstelle. Allerdings ist das Ablegen von Kurven erforderlich bzw. unvermeidbar, wenn es sich um nicht vollständig abwickelbare Bauteiloberflächen handelt. Dann ist es nicht möglich, die gesamte Bauteiloberfläche ausschließlich mit geodätischen Bahnen zu belegen. Das Ablegen von Kurven wird auch unumgänglich zur Verstärkung von belasteten

und unbelasteten Ausschnitten. In Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie und der Tapebreite entspricht selbst das Ablegen entlang des geodätischen Pfades einer Kurve, da sich praktisch nur ein sehr kleiner Teil der Tapebreite auf der geodätischen Linie befindet. BRANDIS [28] beschreibt in seiner Arbeit eine Schervorrichtung, die das einlaufende duroplastische Prepreg-Tape vor dem Ablegen entsprechend des Kurvenradius schert und somit eine Faltenbildung vermeidet.

Dies ist bei der Verarbeitung thermoplastischer Tapes nur schwer möglich, da das Tape ansonsten aufgeschmolzen, geschert und dann bis zur Ablage schmelzflüssig gehalten werden müsste. Daher kommt es beim Thermoplast-Tapelegen auf der Innenseite der Kurve zur Stauchung des Tapes, was ab einem bestimmten Grenzwert ein Wellen der Fasern auf der Kurveninnenseite hervorruft. Diese Faltenbildung auf der Kurveninnenseite (Ondulation) tritt relativ regelmäßig auf und wird mit kleiner werdendem Radius in Amplitude und Häufigkeit des Auftretens stärker (Bild 4.23).

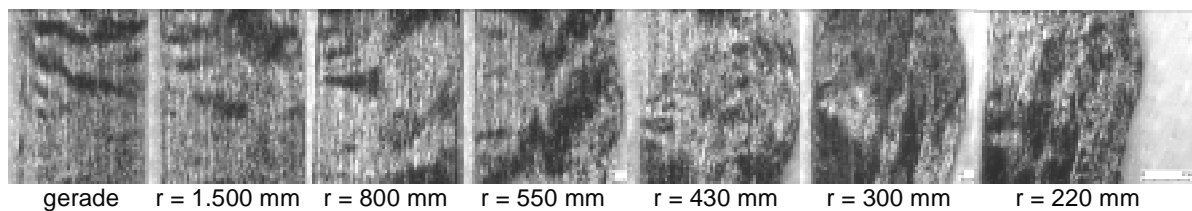


Bild 4.23: Veränderung des Tapes beim Ablegen mit unterschiedlichen Radien (Innenseite jeweils rechts)

Die auftretenden Falten resultieren in einer wechselnden Ablegebreite und stellen eine Art Fehlstelle dar, da die gewellten Fasern die Spannung nicht in gleichem Maße wie die gestreckten Fasern tragen können, wie VOR DEM ESCHÉ [70] bereits darlegte. Bei genauerer Analyse der Ondulationen verschiedener Halbzeuge, die auf unterschiedlichen Radien abgelegt wurden, können neben den in [70] beschriebenen weitere Phänomene festgestellt werden, die die Gültigkeit einer allgemeinen Modellierung der Ondulation einschränkt. Im Rahmen der Analyse wurde die in Kapitel 4.1 betrachteten Halbzeuge mit unterschiedlichen Prozessparametern auf einer Trägerplatte aus GF/PA12 mit unterschiedlichen Radien abgelegt.

In Bild 4.24 sind die bei der Analyse gefundenen Ausprägungen der Faltenbildung beim Legen von Radien dargestellt. Dabei kommen die unterschiedlichen Faltenarten nicht unabhängig vom Halbzeug und den Prozessparametern vor. Bei der Ausbildung der Falten spielen die Tapegeometrie, die Matrix, der Faservolumengehalt

und die Prozessparameter eine maßgebliche Rolle. Nachstehend werden die durch Änderung eines Prozessparameters hervorgerufenen Änderungen bei der Faltenbildung beschrieben.

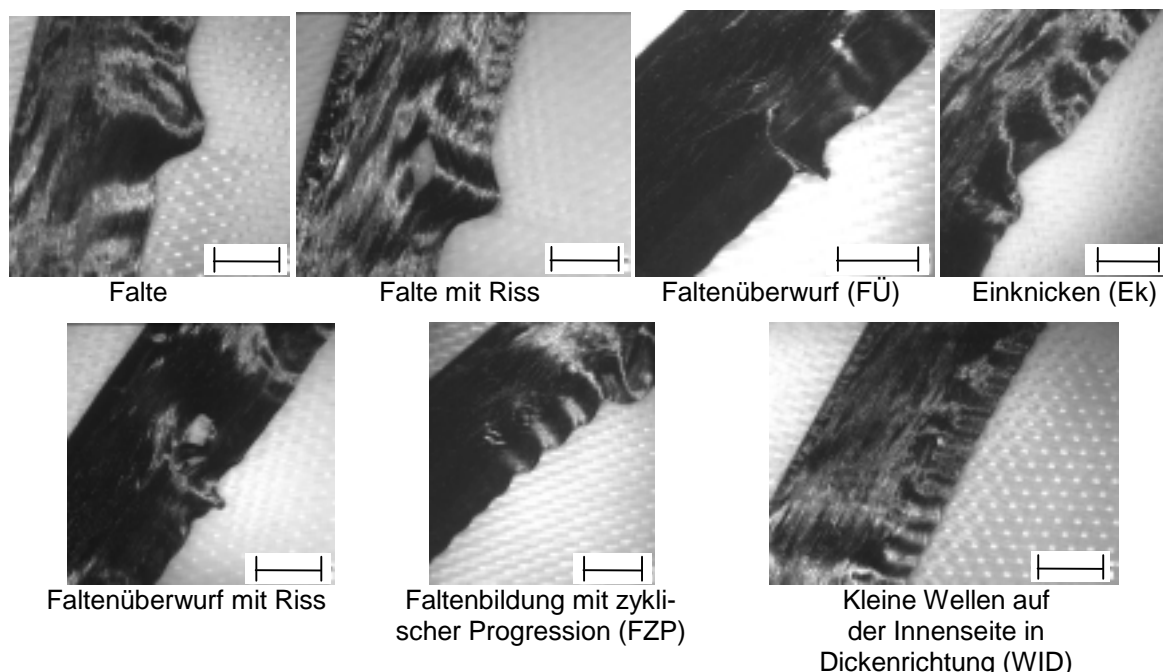


Bild 4.24: Klassifizierung der Faltenbildung beim Legen von Radien (Maßstab: 5 mm)

Die PPS-Matrix mit geringerer Schmelzviskosität im Vergleich zu PEEK erzeugt deutlich weniger sichtbare Fehlstellen (Risse, FÜ), die das Laminat schädigen. Die Faltenbildung erfolgt regelmäßiger (praktisch keine FZP und WID), da sich das Tape Matrix-dominiert verhält. So ist die Oberfläche des abgelegten Tapes häufig „zerknittert“ und verschmiert. Die Erhöhung des Faservolumengehalts von 50 % auf 61 % bei CF/PEEK zeigt als deutlichen Effekt die Rissbildung bei Falten, wobei die Rissbildung bei Faltenüberwürfen unabhängig vom Faservolumengehalt zu sein scheint. Unabhängig von der Matrix und dem Faservolumengehalt ist die Faltenbildung bei breiten Tapes im Vergleich zu schmalen Tapes unregelmäßiger (WID, Ek, FZP) und mit stärkeren Laminatschädigungen (FÜ, Riss) verbunden. Die Faltenarten WID, Ek und FZP scheinen nur bei breiten Tapes vorzukommen. Eine Erhöhung der Tapedicke bewirkt bei den schmalen Tapes kaum eine Änderung der Faltenbildung. Dagegen findet man bei den breiten Tapes eine verstärkte Neigung zur FÜ-Bildung. Insofern kann die Aussage von [70] bestätigt werden, dass ein Anstieg des Konsolidierungsdrucks (p) neben der Vergrößerung der ausgebildeten Falten lediglich einen geringen Einfluss auf die Unregelmäßigkeit der Faltenbildung hat. Im Vergleich dazu

ist der Einfluss einer erhöhten Ablegegeschwindigkeit (v) stärker. Es bilden sich deutlich mehr FÜ und Risse. Den stärksten Einfluss auf die Faltenbildung hat erwartungsgemäß die Änderung des Ablegeradius (r). Neben der Erhöhung der Faltengröße und -anzahl treten negative Einflüsse hinsichtlich Laminatschädigung und Unregelmäßigkeit mit kleiner werdendem r verstärkt auf (Bild 4.25).

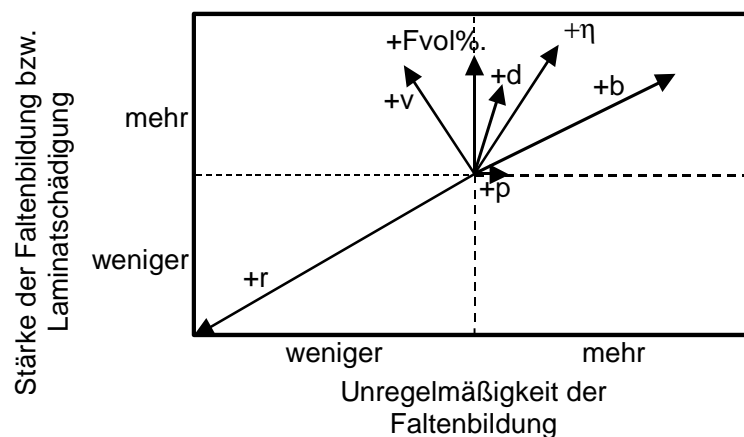


Bild 4.25: Einflüsse der Prozessparameter auf die Faltenbildung

Das Tape wird in der Regel nicht über die gesamte Breite durch die Faltenbildung beeinflusst. Allerdings sind auf der Oberfläche verschiedene Zonen erkennbar. Bild 4.26 zeigt als Foto und schematische Darstellung die gefundenen Zonen der Faltenbildung. Zone I kennzeichnet danach den kleinen Bereich auf der Außenseite, in dem das Tape nahezu unbeeinflusst ist und die Fasern gestreckt im Verbund vorliegen.

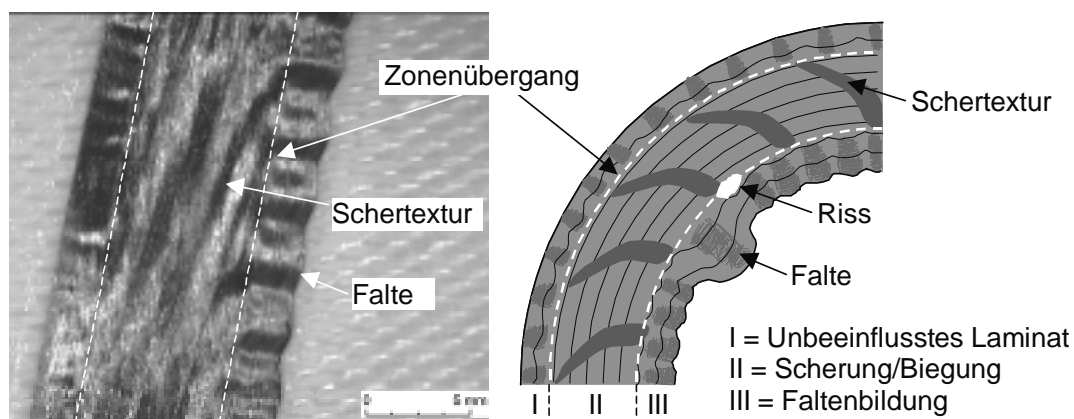


Bild 4.26: Verschiedene Zonen der Faltenbildung

Dieser Bereich geht über in den großen Bereich der Tapescherung und -krümmung (Zone II). Hier sind auf der Oberfläche Schertexturen und mitunter kleine

Wellen in Dickenrichtung zu erkennen. Mit kleiner werdendem Radius wird die Zone größer und die Schertextur richtet sich von der Senkrechten immer weiter zur Parallelen der Tapelängsachse aus. In Zone III erfolgt die Faltenbildung entsprechend der vorangegangenen Klassifizierungen. Die Rissbildung tritt dabei immer im Übergang zwischen Zone II und III auf.

4.4.3 Modell zum Ablegen von gekrümmten Bahnen

Auch wenn die Notwendigkeit von Kurven geometrisch auf ein Minimum zu reduzieren ist, so ist sie dennoch nicht vollständig zu vermeiden. Neben der in [70] beschriebenen Berechnung der Laminatschwächung durch gekrümmte Fasern sind aber auch die genaue Kenntnis der Amplitude und Häufigkeit der Ondulationen wichtig. Der Maschinenparameter „Ablegebreite“ muss entsprechend auf diese Werte eingestellt werden, um zu große Lücken und Überlappungen zu vermeiden. In diesem Kapitel soll daher ein Modell entwickelt werden, das erste Näherungen von Amplitude und Häufigkeit der Ondulationen ermöglicht. Auf Basis der Erkenntnisse des vorangegangenen Kapitels erfolgt eine Beschreibung des abgelegten Tapes entsprechend Bild 4.27.

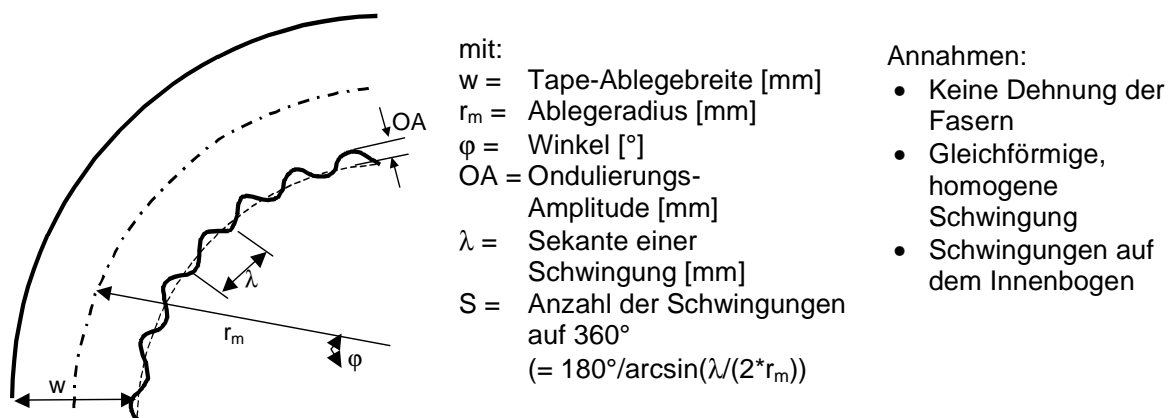


Bild 4.27: Geometrische Parameter des ondulierten Tapes

Das Tapeverhalten kann mathematisch beschrieben werden mit einer Schwingung auf einer Kreisbahn (Gleichung 4.4).

Gleichung 4.4: Mathematische Beschreibung der inneren Kurvenbahn

$$f(\varphi) = \begin{pmatrix} x(\varphi) \\ y(\varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\left(r_m - \frac{w}{2} \right) + OA \cdot \sin(S \cdot \varphi) \right) \cdot \sin(\varphi) \\ \left(\left(r_m - \frac{w}{2} \right) + OA \cdot \sin(S \cdot \varphi) \right) \cdot \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

Die Prozess- und die Materialparameter haben in erster Linie einen Effekt auf die Amplitude OA und die Anzahl der Schwingungen auf 360° (S). Da vor allem die Amplitude einen Einfluss auf die Laminatqualität hat, wird sich das Modell auf dessen Vorhersage beziehen. Wie durch [70] bestätigt, besteht der Ansatz der Modellierung in der Gleichsetzung der inneren (L_i) und äußeren (L_a) Kurvenlänge (Gleichung 4.5).

Gleichung 4.5: Berechnung der inneren und äußeren Kurvenlänge

$$L_a = 2 \cdot \pi \cdot \left(r_m + \frac{w}{2} \right)$$

$$L_i = \int \left| \frac{d\vec{f}(\varphi)}{d\varphi} \right| d\varphi = \int \sqrt{\left(r_m - \frac{w}{2} \right)^2 + 2 \cdot \left(r_m - \frac{w}{2} \right) \cdot OA \cdot \sin(S \cdot \varphi) + OA^2 \cdot \sin^2(S \cdot \varphi) + OA^2 \cdot S^2 \cdot \cos^2(S \cdot \varphi)} d\varphi$$

Zur Lösung des analytisch nicht integrierbaren Integrals für L_i wird die Trapezmethode der numerischen Integration benutzt. Für definierte w , r_m und OA wird S variiert, bis die Bedingung $L_i = L_a$ erfüllt ist. Bild 4.28 zeigt das Kennfeld für $w = 5,83$ mm.

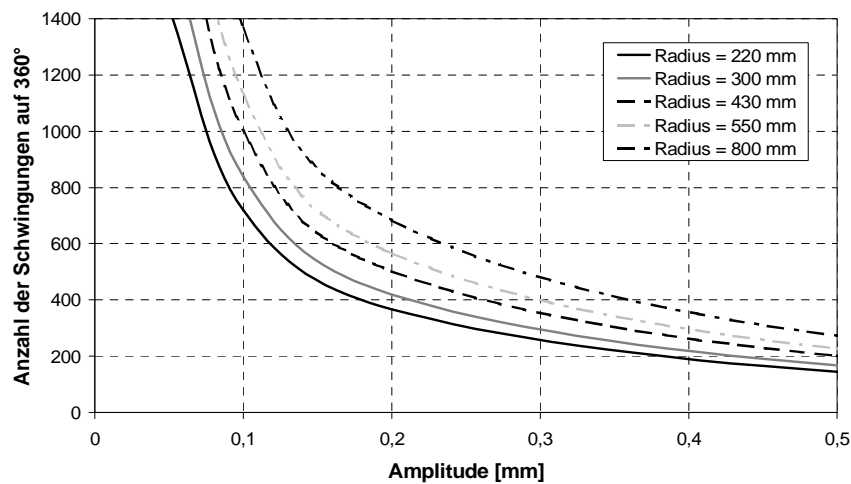


Bild 4.28: Berechnetes Kennfeld für eine Ablegebreite von 5,83 mm

Anhand des Kennfelds lässt sich bereits die Beziehung $OA = \alpha(r_m, b)/S$ mit $\alpha(r_m, b) = \beta(b) \cdot r_m^{\gamma(b)}$ bilden, wobei $\beta(b_a)$ und $\gamma(b_a)$ Polynome 2. Grades sind. Da S noch nicht durch ein materialspezifische Modell dargestellt werden kann, wird die

erforderliche Funktion mittels experimenteller Daten abgeschätzt. Hierzu wurden die Werte für ein CF/PEEK Tape (5 x 0,2 mm², 50 Fvol%), das mit unterschiedlichen Prozessparametern abgelegt wurde und dadurch unterschiedliche Ablegebreiten aufwies, ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 4.29 dargestellt.

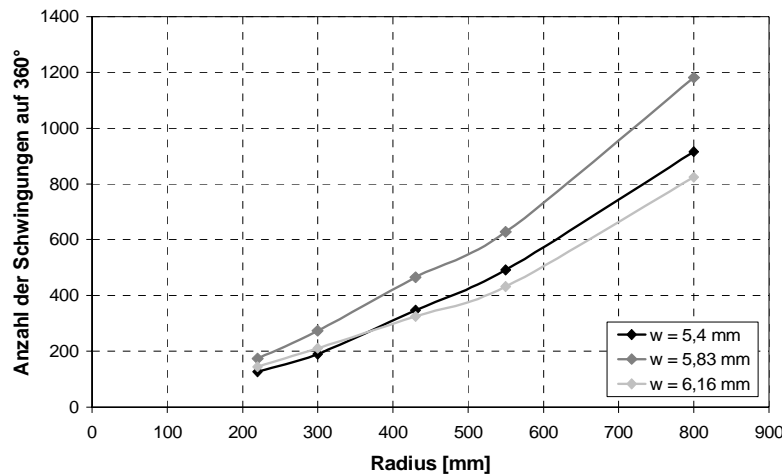


Bild 4.29: Gemessene S-Werte für den Ablegeversuch mit CF/PEEK (5 x 0,2 mm², 50 Fvol%).

Durch eine Regressionsanalyse und gleichem Vorgehen wie bei der vorangegangenen Beziehung lässt sich S ebenfalls durch eine „power law“ Beziehung annähern. Durch Einsetzen dieser Beziehung ergibt sich eine Gleichung für OA, die nur von Kurvenradius und Ablegebreite abhängig ist (Gleichung 4.6).

Gleichung 4.6 Allgemeine Gleichung zur Näherung von OA

$$OA = \frac{\beta(w) \cdot r_m^{\gamma(w)}}{\delta(w) \cdot r_m^{\phi(w)}}$$

Zur Ermittlung der Halbzeug-spezifischen Beziehung sind zunächst die normale Ablegebreite und verschiedene S-Werte für unterschiedliche Ablegeradien experimentell zu ermitteln. Mittels Gleichung 4.6 können dann A und S für beliebige Radien ermittelt werden. Bild 4.30 zeigt den Vergleich von gemessenen und berechneten Werten für w = 5,83 mm und w = 6,16 mm [106].

Mit dem Modell lassen sich mit wenigen Messpunkten und einer bekannten Ablegebreite die Amplituden für unterschiedliche Radien bestimmen und somit die Laminatschädigung abschätzen bzw. den Maschinenparameter Ablegebreite bestimmen.

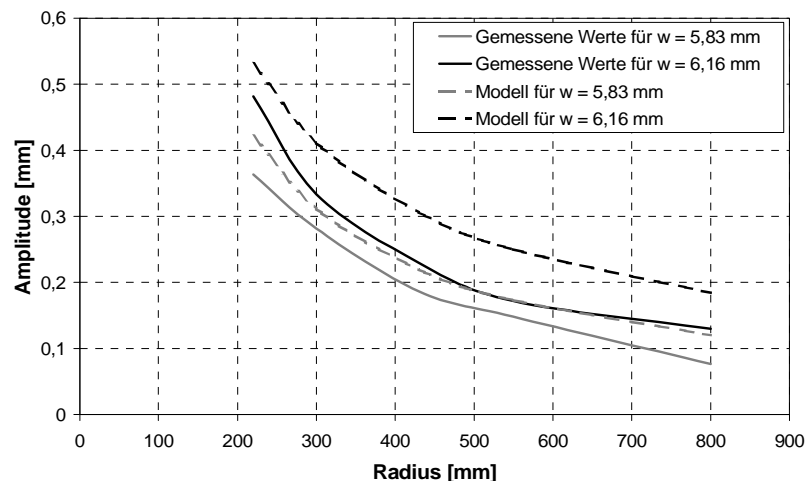


Bild 4.30: Vergleich der berechneten und gemessenen Werte für OA

Fazit: Die Drapierbarkeit der Thermoplast-Tapes ist begrenzt, so dass es beim Ablegen von Kurven zu einer regelmäßigen Faltenbildung (Ondulation) auf der Kurveninnenseite kommt. Mit kleiner werdendem Kurvenradius nehmen die Ondulations-Amplitude und die Anzahl der Schwingungen auf 360° zu. Die Art der Faltenbildung erfolgt dabei keinesfalls gleich, sondern ändert sich mit den Parametern Geschwindigkeit, Fvol%, Tapedicke, Tapebreite und Matrix. Über die Tapebreite lassen sich drei Zonen identifizieren, die von der Kurvenaußen- zur Kurveninnenseite von einem unbeeinflussten über einen gescherten Bereich in den Bereich der Faltenbildung übergehen. Risse treten in diesem Zusammenhang immer im Übergang zwischen den letzten beiden Zonen auf. Zur Ableitung des wichtigen Prozessparameters Ablegebreite kann die Ondulations-Amplitude mit Hilfe eines einfachen Modells näherungsweise bestimmt werden.

4.5 Optimierung der Anlagentechnik

4.5.1 Weiterentwicklung des Tapelegekopfes

Bei den durchgeführten Versuchen zeigt sich, dass der bisher benutzte TLK (siehe Bild 2.22) einige Defizite aufweist. Diese sollen im Rahmen einer Neuentwicklung eliminiert werden. Dazu wurde ein Lastenheft für die Funktionen des TLK aufgestellt [107]. Der auf Basis dieser Anforderungen entwickelte neue Tapelegekopf Evo. I ist in Bild 4.31 dargestellt.

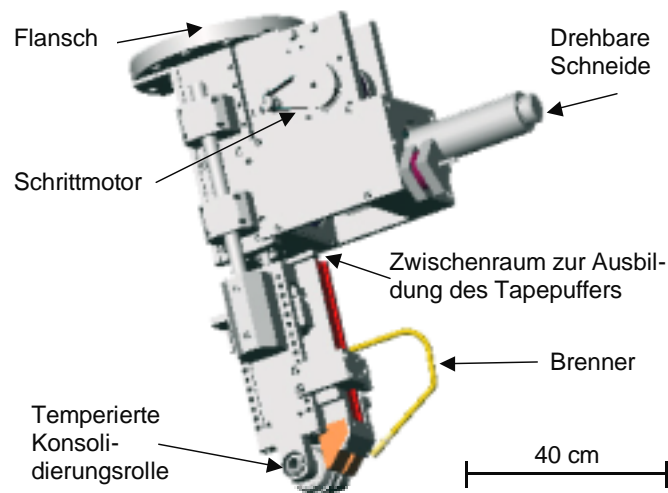


Bild 4.31: Tapelegekopf Evo I

Im Vergleich zum bisherigen Tapelegekopf weist dieser eine wesentlich kompaktere und steifere Bauweise auf. Auch ist der TLK schlanker gebaut, um einen möglichst geringen Bauraum zu realisieren. Die Funktionseinheiten sind linear angeordnet, so dass nur eine geringe Umlenkung des Tapes erforderlich wird. Die Halbzeugschule ist im Rahmen der Laborversuche direkt am Tapelegekopf angebracht und sichert somit eine verdrehfreie Tapezuführung. Zur Erhöhung der Funktionalität wurde die Reduzierung der minimalen Schnittlänge zunächst nicht realisiert. Stattdessen wurde eine drehbare Schneidvorrichtung integriert, die eine freie Wahl der Tapeante am Bahn-anfang und -ende ermöglicht. Mittels dieser Schneide soll zukünftig in Versuchen geklärt werden, in wieweit eine materialsparende Ablage konturgenau umsetzbar ist. Die Schnittwinkel sind in Abhängigkeit von der Tapebreite zwischen $\pm 45^\circ$ frei variierbar. Der Schneidprozess erfolgt dabei völlig störungsfrei, da die Ausbildung einer Tapeschleife einen Puffer erzeugt und ein kurzzeitiges Abstoppen des Tapes beim Schneiden verhindert. Zur Ausbildung des Tapeuffers wird kurz vor dem Schneid-vorgang durch den Vorschubmotor mehr Tape gefördert als für die Ablegegeschwin-digkeit benötigt wird. Das überschüssige Tape bildet dann zwischen der oberen und unteren Hälfte des TLK eine Schleife aus.

Der Transport des Tapes erfolgt mittels Schrittmotoren. Sie erlauben einen schnellen (0 – 30 m/min) und genauen (< 1 mm) Transport des Tapes. Die geförderte Länge kann hierbei mit einem Inkrementalgeber ermittelt werden. Zur Konsolidierung wird eine mit Wasser auf 20 – 90 °C temperierbare Konsolidierungsrolle verwendet. Die Konsolidierungskraft wird mit Hilfe eines Pneumatikzylinders appliziert (90 - 330 N).

Die Zuführung des Tapes erfolgt durch einen in der Breite passgenauen Kanal (Bild 4.32), der ein Ausfädeln oder Verhaken sowie das Ausbilden einer undefinierten Tapelänge verhindert. Der TLK ist modular aufgebaut, so dass der gesamte Führungskanal bis zur Konsolidierungsrolle leicht gewechselt werden kann, um andere Tapebreiten zu verarbeiten. Durch die geradlinige Ausrichtung der Tapeführung ohne Umlenkung wird auch das Risiko der Tapebeschädigung beim Umlenken reduziert.

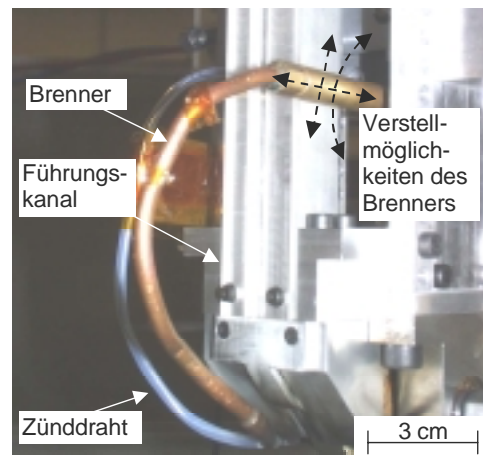


Bild 4.32: Verstell- und biegbare Brennerdüse des TLK Evo I

Die Aufheizvorrichtung ist sowohl translatorisch als auch rotatorisch verstellbar, um eine Reproduzierbarkeit von Orientierung und Abstand der Brennerdüse zum Konsolidierungspunkt zu ermöglichen. Die Verstellmöglichkeit wurde gut zugänglich angebracht. Der Bauraum des Wasserstoff-/Sauerstoffbrenners konnte im Vergleich zum alten TLK durch Verwendung eines biegbaren Brennerrohres stark verkleinert werden. Dadurch ist der Brenner nahezu beliebig einstellbar. Die Zündung der Flamme erfolgt elektrisch mittels Zündfunken.

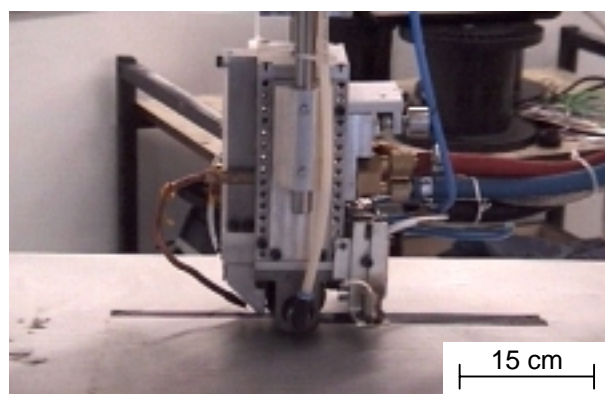


Bild 4.33: Der TLK Evo I im Einsatz

Im Vergleich zum bisherigen TLK sind die Funktionalität und insbesondere die Zuverlässigkeit bzw. Reproduzierbarkeit stark verbessert, und der Betrieb konnte schon nach wenigen Optimierungsarbeiten aufgenommen werden (Bild 4.33). Im Gegensatz zu den anfänglichen Versuchen an der Portalanlage (siehe Bild 4.12) wurde der Prozess vollständig auf eine Roboterzelle mit einem 6-Achs-Knickarmroboter der 135 kg Klasse von KUKA übertragen [103]. Der Roboter ermöglicht durch seine Kinematik einen variableren Einsatz hinsichtlich der Funktionalität eines Tapelegekopfes und der vorliegenden Bauteilgeometrie. Zusätzlich besitzt die Robotik hohe Beschleunigungswerte, was vergleichsweise niedrige Zykluszeiten ermöglicht. Die Robotersteuerung ist durch den Feldbusbetrieb einfach in die übrige Steuerungsperipherie einzubinden. Eine hohe Entwicklungsstufe des Gesamtprozesses wird aber nicht zuletzt durch seine umfassende steuerungstechnische Integration erreicht.

4.5.2 Steuerung des Prozesses

Zur Verbesserung der Anlagensteuerung wird die existierende Roboterzelle um ein Feldbussystem erweitert. Über einen Steuerungs-PC mit einer sog. Anschaltbaugruppe wird das Robotersystem, zwei Buskästen mit verschiedenen digitalen und analogen Ein-/Ausgabefunktionen und einer SPS mit integrierter Schnittstelle miteinander verknüpft. Der Remote Field Controller verfügt über schnelle Ein-/Ausgänge (Schaltzeit $< 15 \mu\text{s}$) und ein IEC-61131-Laufzeitsystem (1,6 ms für 1K Anweisungen). Von ihm werden die Standardfunktionen des Prozesses übernommen und somit die Totzeiten für Transport-, Positionier- und Orientierungsvorgänge minimiert. Die Zykluszeiten des übergeordneten Feldbussystems betragen $< 5 \text{ ms}$. Auf diese Weise wird eine industrienähe Steuerung realisiert, die sich leicht in Fertigungsprozesse integrieren lässt.

Bild 4.34 zeigt die beiden auf dem Roboter montierten Buskästen sowie den Steuerungs-PC. Die Steuerung des Systems wird mit dem Messdaten- und Steuerungsprogramm Diadem visuell unterstützt. Neben der Industrialisierung der Anlagenperipherie wurde auch die Flammsteuerung optimiert. Dazu wurde eine analoge Flammsteuerung in den Prozess integriert, die eine Regelung des Gasstroms in Normliter pro Minute ermöglicht. Auf diese Weise konnte nicht nur die An-/Ausfunktion der

Aufheizvorrichtung in Verbindung mit dem Zünddraht vollkommen elektronisch gestaltet, sondern auch eine sehr hohe Reproduzierbarkeit erreicht werden [107].

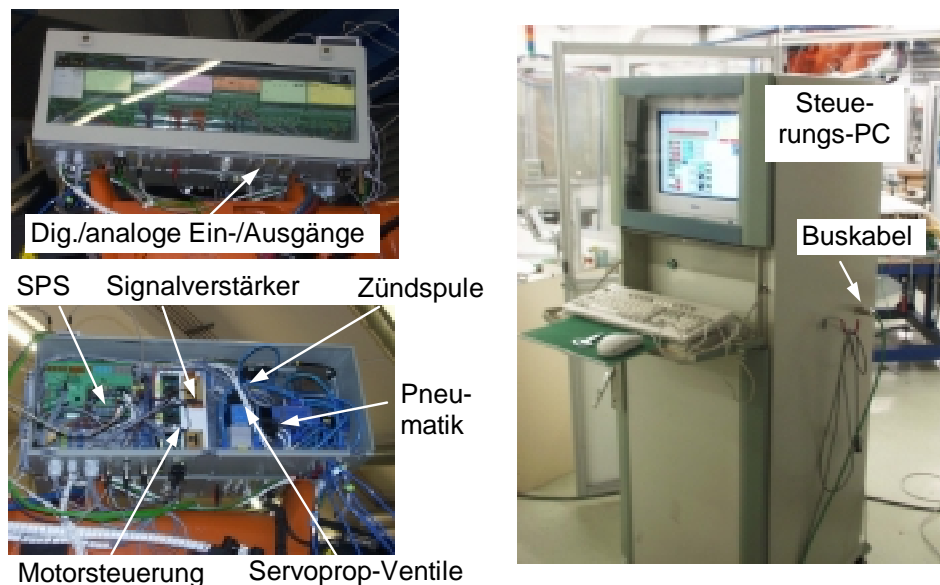


Bild 4.34: Buskästen und Steuerungs-PC des Thermoplast-Tapelegeprozesses

4.5.3 Ansetzen und Absetzen der Ablegebahn

In Kapitel 2.4 wurde bereits die Schwierigkeit der Konsolidierung des Bahnanfangs und -endes dargelegt. Am Bahnanfang besteht das Problem, dass das Tape mangels Aufheizung nicht anhaftet, aber ohne die Anhaftung des Anfangs nicht abgerollt werden kann. Als Lösung wird bisher der Tapeanfang so weit vortransportiert, dass er etwas über den Nip-Point hinaussteht. Als Nip-Point wird der erste Kontaktpunkt von Laminat und abgelegten Tape bezeichnet. Er liegt demnach etwas vor der Senkrechten unter der Konsolidierungsrolle.

Durch Aufsetzen des TLK auf der Werkzeugplattform wird der Tapeanfang zwischen Rolle und Werkzeugoberfläche eingeklemmt und so festgehalten. Wesentlicher Nachteil dieses Vorgehens ist, dass der überstehende Tapeanfang nicht mehr konsolidiert werden kann, da er sich bereits auf der von der Aufheizquelle abgewandten Seite der Rolle befindet. Durch Versuche konnte gezeigt werden, dass sich dieses Problem mit Hilfe einer intelligenten Steuerung der Vorschubmotoren lösen lässt. Dazu wird die Konsolidierungsrolle etwas vor dem Startpunkt der Bahn aufgesetzt. Kurz nachdem der TLK mit einer definierten Geschwindigkeit losfährt und die Aufheizquelle angeschaltet ist, wird das Tape unter Ausnutzung der Eigensteifigkeit so in den Nip-Point eingefahren, dass es mit seinem Anfang bündig

in den Nip-Point eingefahren, dass es mit seinem Anfang bündig auf dem Startpunkt der Bahn liegt. Durch dieses Vorgehen (Bild 4.35) kann auch der Tapeanfang aufgeschmolzen und konsolidiert werden.

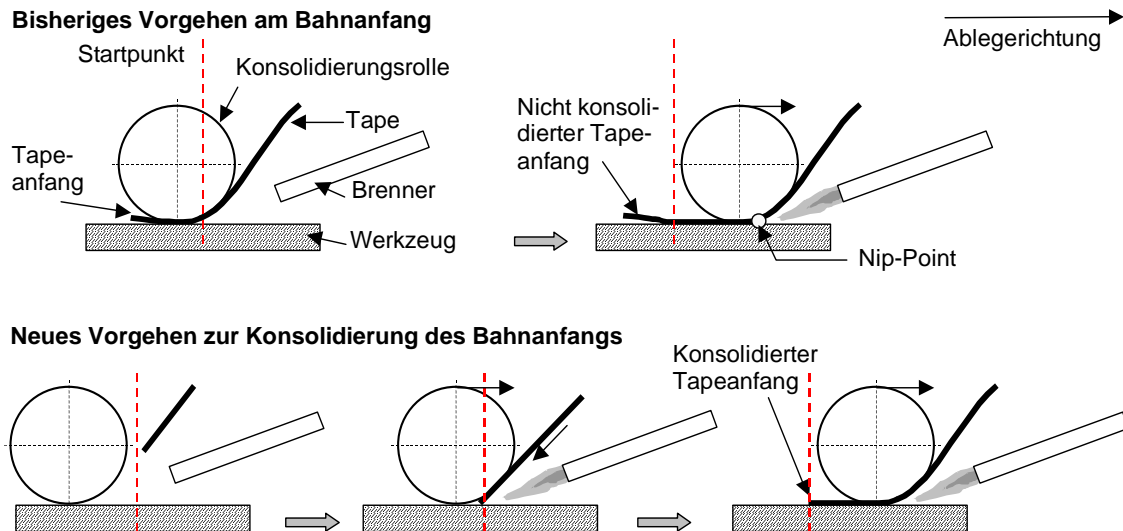


Bild 4.35: Lösungskonzept zur Konsolidierung des Bahnanfangs

Am Bahnende entsteht das Problem, dass nach dem Schneiden des Tapes keine Bandspannung mehr applizierbar ist. Das restliche Teilstück des abzulegenden Tapes (Abstand Nip-Point – Schneide) wird nicht mehr richtig geführt und ändert nach dem Verlassen des Führungskanals kurz vor der Rolle den Einfahrwinkel. Die Erwärmung erfolgt dann meist undefiniert und führt häufig zu Verbrennungen. Zusätzlich vergrößert sich die Ablegebreite des Reststücks, da die Fasern ungehindert zur Seite gedrückt werden können. Im Falle einer Verlängerung des Führungskanals bis kurz vor den Nip-Point ist die Aufheizung des Tapes nicht mehr möglich. Daher scheidet diese und alle steuerungstechnischen Varianten aus. Stattdessen ist das letzte Stück des Zuführungskanals mit mehreren Bohrungen versehen, über die Luft angesaugt wird. Auf diese Weise entsteht unter dem Tape ein Unterdruck, der es zur Führungsspitze anzieht. Das Tapeende ist dadurch nur noch auf der Länge Nip-Point bis Ende der Führungsspitze (~ 2,5 cm) nicht geführt. Die bisher durchgeführten Versuche zeigen eine deutliche Verbesserung des Ablegeverhaltens am Bahnende.

4.6 Ablegeversuche und Ermittlung von Verarbeitungsparametern

Zur Bewertung der bisherigen Entwicklungsarbeiten werden in diesem Kapitel die erreichbaren Laminatqualitäten untersucht. Dazu wurden insgesamt acht Platten aus CF/PEEK (12 x 0,135 mm²), 60 Fvol%. mit dem 15-lagigen Laminataufbau [0/90/0/.../90/0] gefertigt. Für die Versuche wurde dieses Tape ausgewählt, da es hinsichtlich der Ablegedicke und des Fvol%. die Anforderungen der Luftfahrtindustrie erfüllt (0,125 mm konsolidierte Dicke und 60 Fvol%). Darüber hinaus lassen sich die ermittelten Werte besser mit Literaturwerten vergleichen. Die Platten besitzen die erforderliche Solldicke von 2 mm für den Short Beam Sheartest (SBS) zur Ermittlung der scheinbaren Scherfestigkeit gemäß DIN EN 2563.

Tabelle 4.7: Daten der tapegelegten CF/PEEK Platten

	Ge- schwind. [m/min]	Volumen- strom [Nl/min]	Konsolidie- rungsdruck [bar] ⁵	Plattendicke [mm]	Dichte [g/dm ³]	Poren- halt ⁶	scheinbare Scherfstkt. [N/mm ²]
Autoklav 1				1,79	1.551	0,00%	90,2
Platte 2	6	10	3	1,93	1.498	3,25%	34,0
Platte 3	6	7	3	2,03	1.463	5,50%	41,6
Platte 4	6	13	3	2,00	1.488	4,00%	16,2
Platte 5	6	10	4	1,94	1.490	3,75%	23,5
Platte 6	6	10	2	1,97	1.516	2,50%	33,4
Platte 7	3	7	2	1,95	1.512	2,50%	45,0
Platte 8	3	5	2	1,90	1.523	1,75%	45,0

Die Plattenfläche beträgt etwa 360 x 360 mm². Die entsprechend der Tabelle 4.7 mit unterschiedlichen Prozessparametern mit dem TLK Evo. I hergestellten Platten wurden zunächst auf die Maße 300 x 300 mm² besäuml, exakt vermessen und gewogen. Mit Hilfe der Messdaten kann die Dichte näherungsweise bestimmt, mit der im Autoklav konsolidierten Platte (Referenzwert 1551 g/dm³) verglichen und der Porengehalt der Platten näherungsweise bestimmt werden. Entsprechend DIN EN 2563 wurden für jeweils 10 Proben die scheinbare Scherfestigkeit bestimmt. Der für die

⁵ Der angegebene Druck ist der Zylinderdruck der Andrückvorrichtung.

⁶ Zur Ermittlung der Porengehalte wurde der Porengehalt der Autoklav-Referenzplatte mit Null angenommen. Der Porengehalt der übrigen Platten wurde durch den Vergleich der Dichten mit der Autoklavplatte näherungsweise ermittelt.

Autoklavplatte ermittelte Durchschnittswert von 90 MPa (maximal wurden 94 MPa gemessen) liegt etwa 10 % unter dem Literaturwert das verwendete Material [108]⁷.

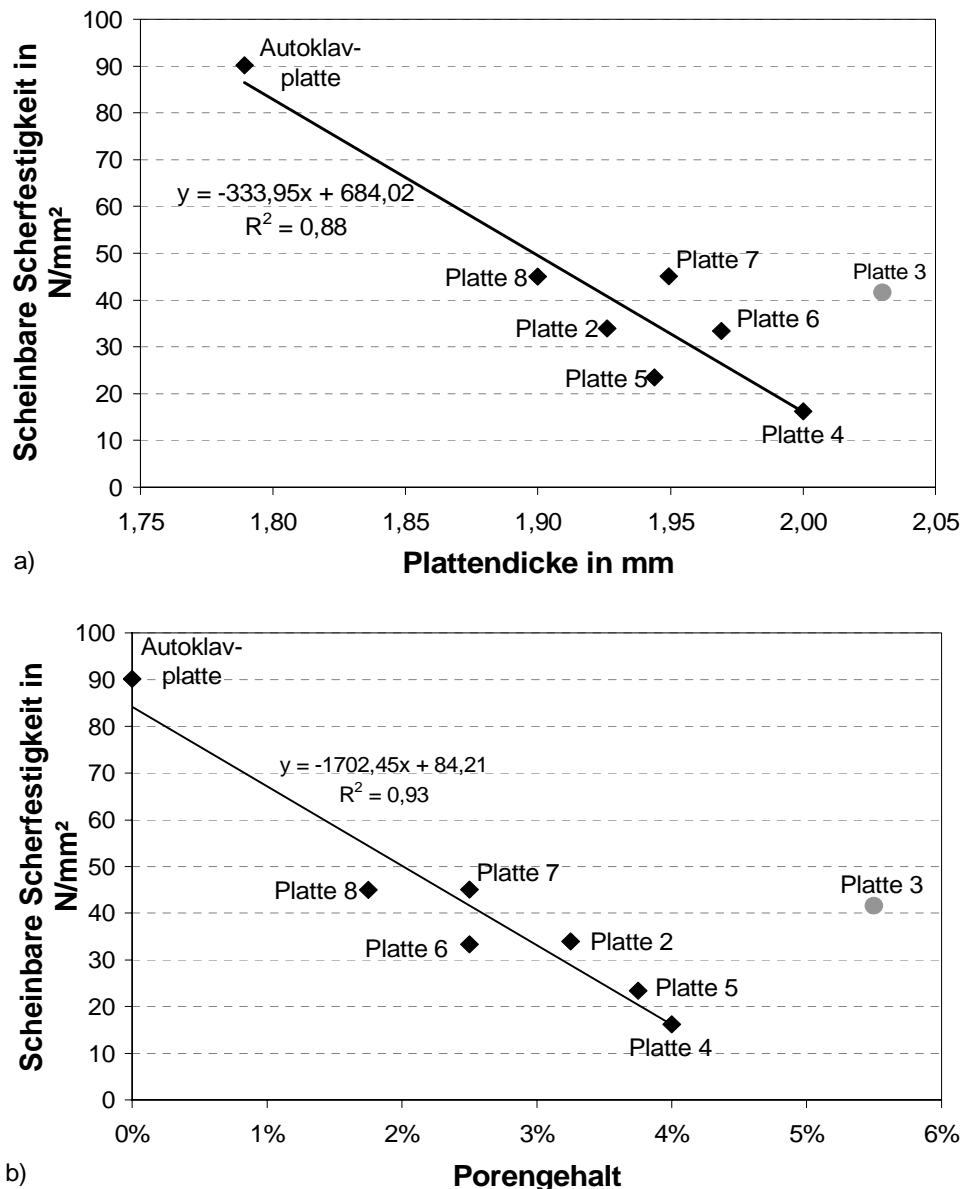


Bild 4.36: Plattendicke a) und Porengehalt b) über der scheinbaren Scherfestigkeit

Bild 4.36a und b zeigen, dass mit den hier gewählten Prozessparametern im Thermoplast-Tapelegeverfahren nur höchstens 50 % des Autoklavwertes erreicht wurden. Unter Ausschluss der Werte für Platte 3 korrelieren die SBS-Werte (Scheinbare Scherfestigkeiten) sehr gut mit der Plattendicke und somit auch mit dem Porenge-

⁷ COGSWELL macht keine Angaben zur verwendeten Prüfnorm zur Ermittlung der SBS-Werte. Er weist aber darauf hin, dass bei dem Test kein klares interlaminares Versagen aufgetreten ist.

halt. Platte 3 gibt diese Tendenz nicht wieder, da trotz des vergleichsweise hohen SBS-Wertes sehr viel Poren vorhanden sind.

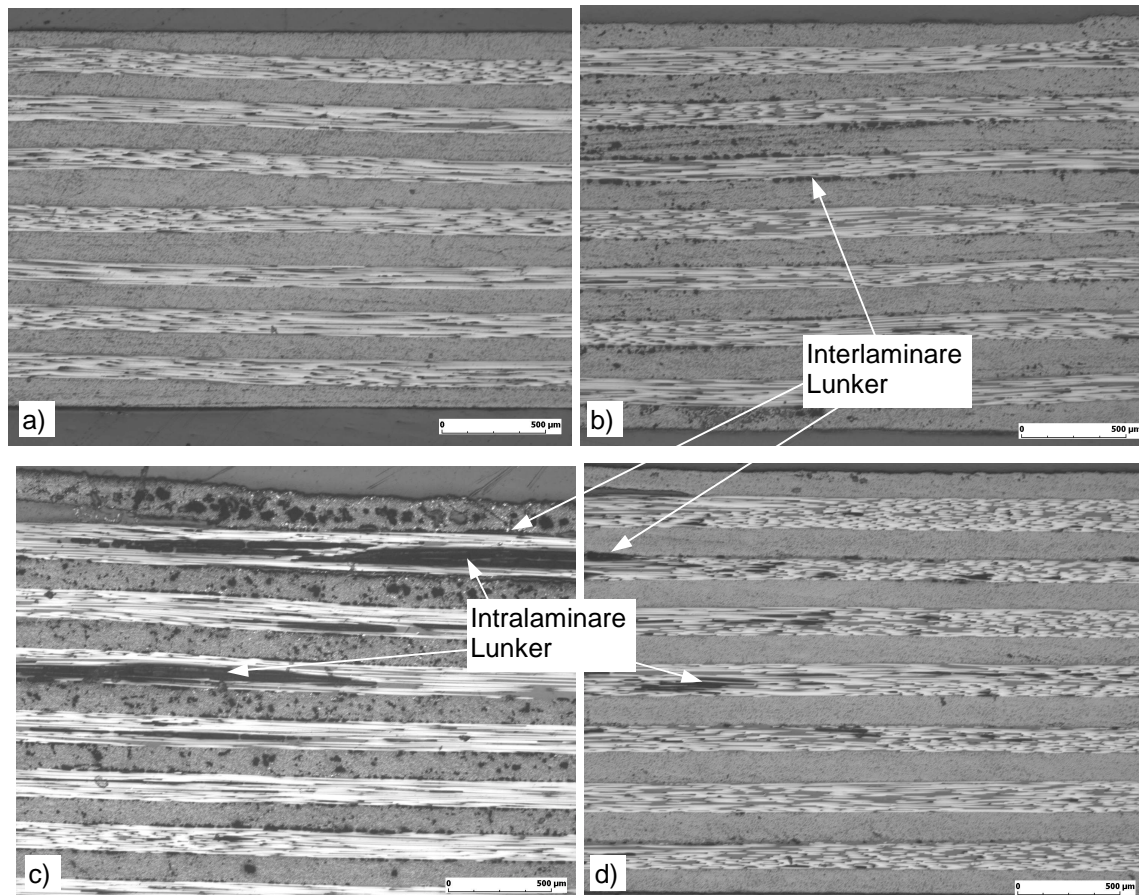


Bild 4.37: Schliffbilder der Autoklavplatte (a), Platte 2 (b), Platte 3 (c) und Platte 8 (d)

Anhand der Schliffbilder der einzelnen Platten (Bild 4.37a-d) lassen sich die Messergebnisse erklären. Die Autoklavplatte (Bild 4.37a) zeigt weder intra- noch interlaminare Fehlstellen. Dagegen zeigt die Tapelege-Platte mit dem höchsten SBS-Wert (Platte 8, Bild 4.37d) zwar eine gute Konsolidierung mit wenig interlaminaren jedoch mit zahlreichen intralaminaren Poren. Platten mit geringeren SBS-Werten zeigen deutlich mehr interlaminare Lunker (Platte 2, Bild 4.37b), die sich demnach trotz gleichem prozentualem Porengehalt deutlich negativer auf die scheinbare Scherfestigkeit auswirken. So lässt sich der Widerspruch aus höchstem Porengehalt und mittlerem SBS-Wert bei Platte 3 anhand von Bild 4.37c und dem großen Delta zwischen der Autoklav- und den Tapelegeplatten erklären. Es zeigt, dass in Platte 3 in der Tat sehr viele Lunker vorhanden sind, die aber in erster Linie intralaminar vorliegen. Als

Ursache hierfür kommen Degradationen aufgrund der starken Wärmezufuhr jedoch nicht in Betracht.

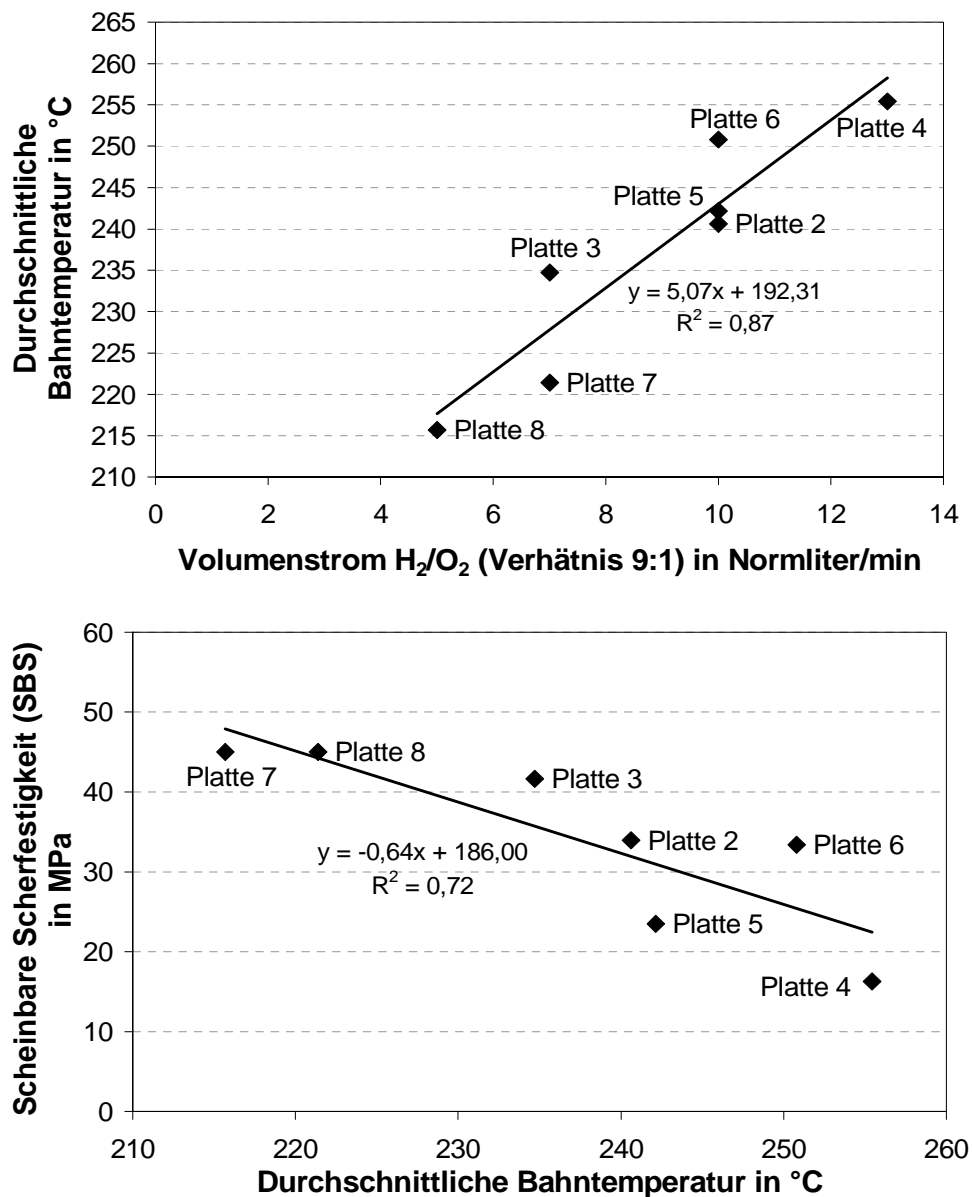


Bild 4.38: Abhängigkeiten zwischen Volumenstrom, Bahntemperatur und SBS-Wert

Die Grafiken in Bild 4.38 belegen, dass die Bahntemperatur⁸ nicht unzulässig hoch war und eher von einem Halbzeugfehler ausgegangen werden muss. Das Einbringen solcher Halbzeugfehler lässt sich nicht gänzlich vermeiden, da sie häufig nicht durchgängig im gesamten Tape einer Spule vorliegen sondern lokal über Zentimeter

oder viele Meter auftreten können. Auch sind Fehler wie Längsrisse nicht immer ohne Schliffbild optisch zu erkennen.

Die Grafiken zeigen auch, dass sich die durchschnittliche Temperatur des gerade abgelegten Tapes (Bahntemperatur) sehr gut über den Volumenstrom steuern lässt. Ebenso korreliert die scheinbare Scherfestigkeit sehr gut mit der durchschnittlichen Bahntemperatur. Die Bahntemperatur steigt mit zunehmender Lagenzahl asymptotisch an, da das Laminat die durch die Flamme zugeführte Wärme schlecht abführen kann. Die Grafik gibt Anlass zur Annahme, dass die Lamine tendenziell mit zu viel Wärmezufuhr gefertigt wurden, wobei durch zukünftige Untersuchungen zu prüfen ist, inwieweit die Werkzeugtemperierung angepasst werden muss. Gegenwärtig sind weiter optimierende Versuche noch nicht möglich, da die Anlagentechnik zunächst in den Bereichen Werkzeug, Temperiermöglichkeit und Steuerung erweitert werden muss. Zudem ist sicherzustellen, dass für die Versuche konstant gute Halbzeug-Eigenschaften vorliegen. Des weiteren lassen die Messwerte erkennen, dass der Konsolidierungsdruck gesenkt werden sollte. Die Werte bestätigen die Vermutung von VOR DEM ESCHE [70], dass es hinter der Kontaktlinie Konsolidierungsrolle in Folge eines zu hohen Anpressdrucks zu einem Hochstellen des noch nicht vollständig konsolidierten Tapes kommt.

Zusätzlich wurden für die Platten die komplexen Biegemodulwerte E^* mittels DMTA ermittelt (Bild 4.39)⁹. Bei einigen Kurven fällt der leichte Anstieg von E^* bis zum T_g auf. Diese „Versteifung“ des Laminats könnte an den in Kapitel 4.1.2 ermittelten Faserondulationen im Halbzeug liegen. Erst nach Streckung der Fasern durch Erwärmung bei Lasteinwirkung erreicht das Laminat seine höchste Steifigkeit.

⁸ Die durchschnittliche Bahntemperatur ist die durchschnittliche Oberflächentemperatur aller abgelegten Tapes einer Platte. Die Temperatur wurde mit Hilfe eines mitfahrenden Pyrometers direkt hinter der Konsolidierungsrolle auf der Tapeoberfläche gemessen.

⁹ Der Verlauf für Platte 6 begründet sich mit einem Maschinenfehler. Die Werte wurden dennoch in die Grafik mit aufgenommen, da hier im wesentlichen die Maximalwerte zu Beginn der Messung interessant sind.

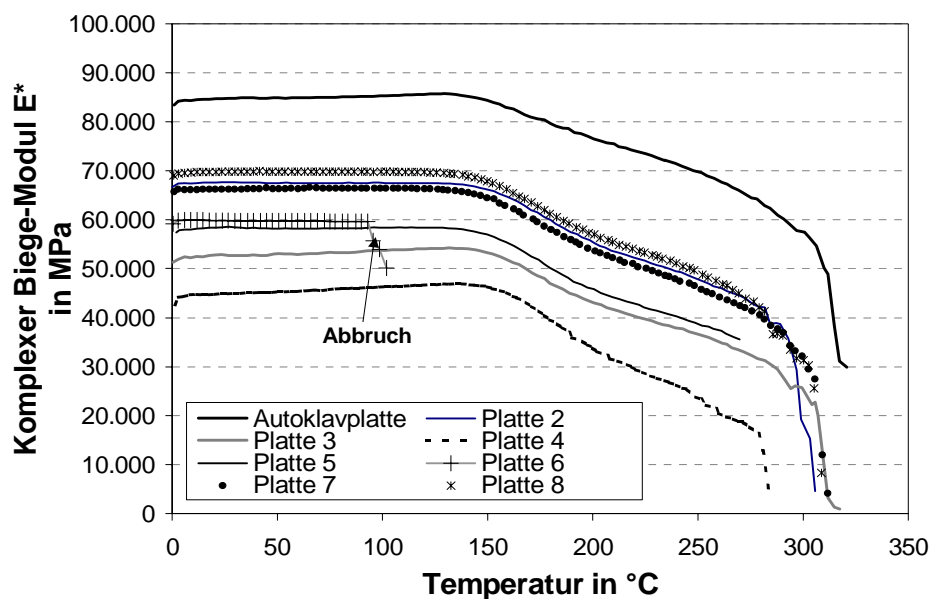


Bild 4.39: Ergebnisse der DMTA-Messungen für die Platten

Fazit: Als Ergebnis dieser Laminatuntersuchungen kann festgehalten werden, dass die maximal erreichte scheinbare Scherfestigkeit etwa nur 50 % des Autoklavwertes beträgt. Ursächlich erscheinen neben Unstetigkeiten/Fehlern im Halbzeug ein zu hoher Anpressdruck und Wärmeeintrag. Für dieses Ergebnis wird ein 12 mm breites CF/PEEK Tape mit 60 Fvol%, ein Zylinderdruck von 2-3 bar und ein Volumenstrom von 3-5 Normlitern/min verwendet. Die Ablegegeschwindigkeit betrug 6 m/min. Gemäß der Schliffbilder sind die Prozessparameter Geschwindigkeit, Druck und Temperatur zur Senkung der inter- und intralaminaren Lunker weiter zu optimieren. Dazu sind ebenfalls eine Erweiterung der Anlagensteuerung sowie Halbzeuge mit konstant guten Eigenschaften erforderlich.

4.7 Aspekte zum Qualitätsmanagement des Gesamtprozesses

Der Aufbau eines neuen Fertigungsprozesses verlangt auch die Betrachtung des Qualitätsmanagements (QM) der einzelnen Fertigungsschritte. Die Vorgehensweise erfolgt in Anlehnung an die Prozess-FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse). Darunter versteht man eine formalisierte Methode zur systematischen und vollständigen Erfassung von möglichen Schwierigkeiten sowie deren Risiken und Folgen noch vor ihrer Entstehung. Die Prozess-FMEA wird im Rahmen einer Produktions-

planungsphase durchgeführt und erfasst die gesamte Handlungskette [109]. Dazu wird zunächst der Prozessablauf allgemein dargestellt. Anschließend wird jeder Prozessschritt auf seine möglichen Fehler hin untersucht. Für jeden einzelnen Fehler wird ein QM-Instrument identifiziert, das zur Entdeckung/Vermeidung dieses Fehlers eingesetzt werden kann. Auf Basis der generierten Liste können zu einem späteren Zeitpunkt die entsprechenden QM-Instrumente für den tatsächlichen Prozess ausgewählt werden. Bild 4.40 zeigt den Prozessplan von der Materialbestellung bis zur Bauteilauslieferung. Dabei sind außerdem die einzelnen Transportvorgänge sowie der mögliche Anfall von Ausschuss gekennzeichnet. Für alle Prozessschritte sind nun im Anhang E die möglichen Fehler sowie die potenziellen QM-Instrumente aufgelistet.

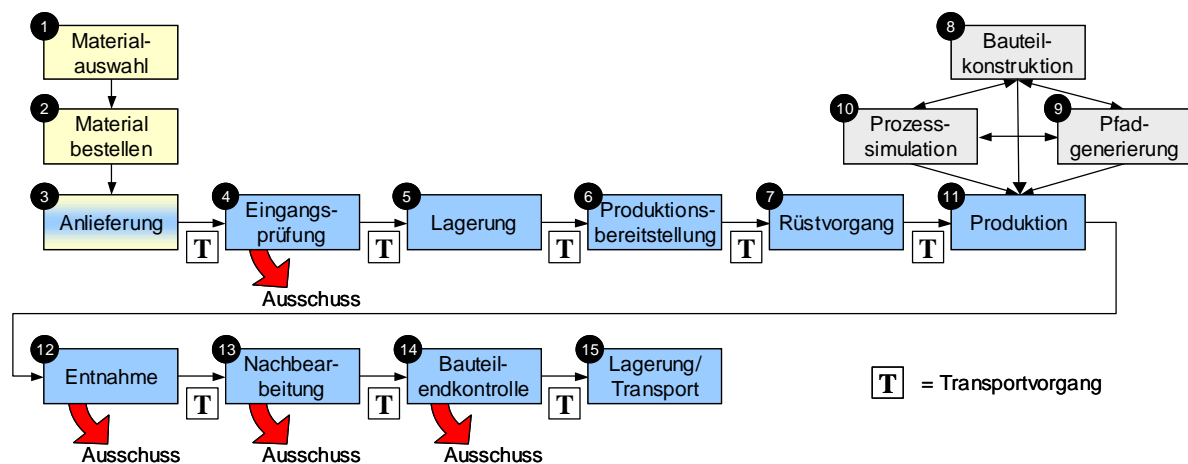


Bild 4.40: Materialfluss beim Tapelegeprozess

Insbesondere Luftfahrtbauteile unterliegen einer exakten Endkontrolle. Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse könnte die Shearographie das wesentliche Instrument zur Untersuchung der Bauteilqualität sein. Die Shearographie ist ursprünglich ein Verfahren zur Spannungsanalyse, wird aber häufig für die zerstörungsfreie Prüfung von großen Bauteilen eingesetzt [110, 111]. Mit der Shearographie können Fehlstellen, Beschädigungen und Delaminationen detektiert und quantifiziert werden. Dazu wird die Bauteiloberfläche mit einem Laser abgescannt. Dies wird wiederholt, wenn das Bauteil unter Spannung steht. Die Spannung kann thermisch, akustisch oder mechanisch bzw. statisch oder dynamisch appliziert werden. Die von der unverformten und verformten Oberfläche emittierte Strahlung wird überlagert, so dass Diskontinuitäten eine unterschiedliche Interferenz zeigen. Die Scann-Geschwindigkeit beträgt 5 m²/h,

was den Einsatz für sehr großflächige Bauteile zulässt [112, 113]. Des weiteren lässt sich das Verfahren auch von innen für Hohlräume einsetzen [114].

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich beim Einsatz der Shearographie für großflächige Flugzeugbauteile in Verbindung mit thermisch induzierten Spannungen bessere Untersuchungsergebnisse ergeben, wenn die Aufnahmen während der Bauteilabkühlung erfolgen [115, 116, 117]. Dieser Effekt lässt sich komplementär mit dem vorgestellten Werkzeugkonzept zur Lösung des Erstlagenproblems verbinden, da das Bauteil bis zum Prozessende temperiert bleibt und dann erst auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Dieser prozessimmanente Abkühlvorgang kann ohne erneute Erwärmung zur Endkontrolle des Bauteils mittels Shearographie benutzt werden. Dies spart neben Kosten einen zusätzlichen Zeitaufwand für das QM.

5 Modellierung des Thermoplast-Tapelegeprozesses

Ziel dieser Arbeit ist, ein Modell für den Tapelegeprozess abzuleiten, das als stetige Funktion Änderungen des Prozesses oder des Bauteildesigns berücksichtigt. Die Modellierung soll zudem ohne empirische Daten erfolgen, da diese für den Prozess nicht ausreichend vorliegen. Als Ansatz zur Modellierung wird daher die technische Modellierung auf Basis der Prozess-basierten Kostenmodellierung (PBKM) gewählt.

5.1 Prozess-basierte Kostenmodellierung

Klassische Instrumente zur Analyse von Kosten haben ihren Ursprung in der Kostenrechnung. Dort liegt der Fokus auf dem, was bereits existiert oder gemacht wurde. Diese zeitliche und technologische Rückwärtsorientierung erlaubt nicht, die Effekte durch Änderungen am Prozess- oder Bauteil-Design zu verstehen [118]. In der Vergangenheit benutzte Kostenanalyse-Methoden werden ausführlich in [119] beschrieben. Nachteile dieser Methoden sind, dass sie auf Intuition oder Schätzung basieren, dass sie unabhängig von der Technologie sind und die Zykluszeit nicht betrachten. Sie vernachlässigen, dass Kosten abhängig von ihrem Kontext sind. Die Verwendung der technischen Modellierung hat folgende Vorteile: Vorgabe von Struktur, Berücksichtigung von Wissen, Implementierung von Annahmen und Einbeziehung von Technologie.

Auf der anderen Seite existieren die beiden möglichen Schwächen der fehlerhaften Modellierung oder des hohen Zeit- und Kostenaufwands [120]. Die PBKM dient als mathematische Transformation/Abbildung eines Prozesses und seiner Betriebsbedingungen zur Messung der Prozessleistung [119]. Im allgemeinen arbeitet die PBKM rückwärts von den Kosten zu den technischen Einfluss-Parametern. Durch Berücksichtigung der Kostenauswirkung von Prozess- und ökonomischen Parametern stellt die technische Modellierung eine Erweiterung der normalen Modellierung dar. Hierbei werden die Kosten-beeinflussenden Elemente individuell von Ingenieurprinzipien und der Physik des Prozesses abgeleitet. Erster Schritt zur Ableitung der PBKM ist die Definition der Fragestellungen hinsichtlich Herkunft und Beeinflussung von Kosten. Im zweiten Schritt werden die Kostenelemente identifiziert und die

Kostenstruktur ermittelt. Anschließend erfolgt eine Analyse des gesamten Prozesses. Der so ausgearbeitete Prozessplan ist Basis für die Kostenmodellierung im 4. Schritt. Hierbei werden die Prozess-Elemente auf ihre physikalische Basis heruntergebrochen. Im 5. und letzten Schritt werden offene Fragen ausgeräumt [121] (Bild 5.1).

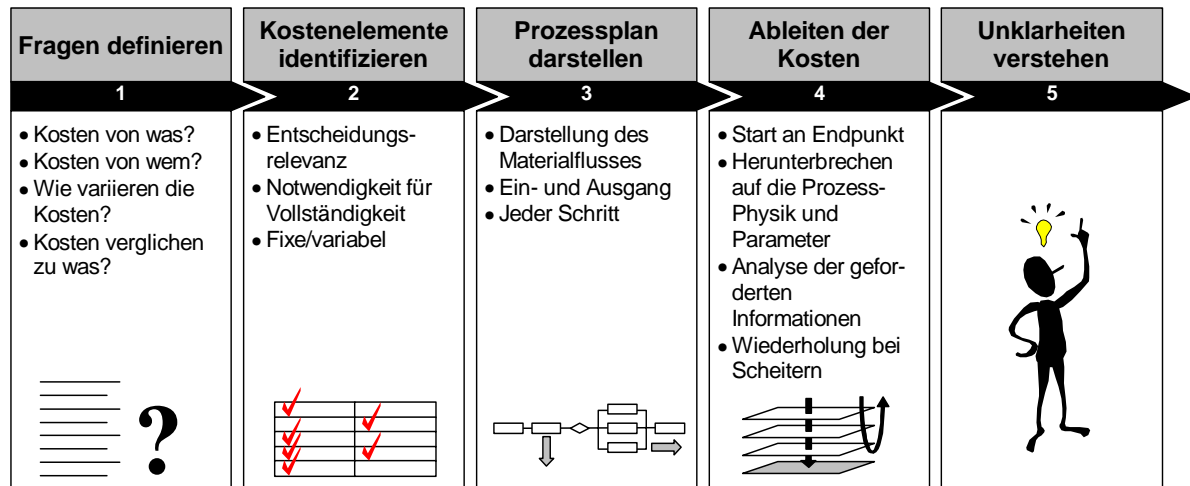


Bild 5.1: Vorgehensweise bei der Prozess-basierten Kostenmodellierung

Zentrales Element innerhalb dieser Vorgehensweise ist der Schritt 4. Innerhalb dieses Schrittes wiederum ist die Ableitung der Prozesszykluszeit die wichtigste Aktivität, da insbesondere die Zykluszeit maßgebend für die Stückkosten ist. Die inhaltliche Vorgehensweise von Schritt 4 wird in dieser Arbeit zur Modellierung der Zykluszeit des Tapelegeprozesses benutzt. Wenn die Prozessbedingungen festgelegt sind, ist die Zykluszeit hauptsächlich eine Funktion des Bauteildesign und des Herstellungsprozesses. Dabei ist jede gefundene Funktion sehr sensibel für Änderungen der Bauteilformkomplexität. Leider ist diese in der Regel nicht einfach beschreibbar und skalierbar. Trotzdem muss ein Modell zur Abschätzung der Zykluszeit die Effekte Bauteilformkomplexität berücksichtigen. Daher wird der Begriff „Komplexität“ im nachstehenden Kapitel definiert, um die Bauteilformkomplexität quantifizieren zu können.

5.2 Abstraktion und Definition von Bauteilformkomplexität

Gemäß CONANT ist Komplexität „ein ärmlich definierter Begriff, in dem die subjektive Komponente so überwiegt, dass es wahrscheinlich unmöglich ist, eine Definition abzuleiten, noch weniger ein Maß, das allen Menschen in allen Umständen gerecht wird“ [122]. Für ein Modell zur Abschätzung der Prozesszeit in Abhängigkeit von der Bauteilformkomplexität ist jedoch die Quantifizierung von Komplexität und deren Einfluss erforderlich. Daher wird in diesem Kapitel Komplexität zunächst allgemein definiert, um später weitere Ableitungen für das Modell zu ermöglichen.

Nach einer Klassifikation [122] besitzt Komplexität einen funktionalen und physikalischen Aspekt. Der physikalische Teil kann weiter in eine makroskopische und mikroskopische Ebene differenziert werden. Mikroskopische Parameter wären z.B. atomare Kräfte. Dagegen lässt sich bei den makroskopischen Parametern zwischen statisch (Geometrie und Materialeigenschaften) und Verarbeitung (Hardware und Software) unterscheiden. Eine andere konzeptionelle Unterscheidung kann zwischen der Komplexität des Zustands (K_s) und der Komplexität der Interaktion (K_i) gemacht werden. K_s ist die Komplexität eines einzelnen Systems, z.B. Bauteile, Material und die Umgebung in der es produziert wird. K_i beschreibt die Komplexität durch Interaktion zwischen zwei Systemen. Außerdem werden die Komplexität der Konzentration und die Komplexität der Verteilung differenziert [122]. Darüber hinaus gibt es die Unterscheidung in statische und dynamische Komplexität. Die statische Komplexität beschreibt die Komplexität der Teile in einem System und die Interaktion der Teile und Prozesse. Im Gegensatz dazu beschreibt die dynamische Komplexität die Unvorhersagbarkeit eines Systems [123].

In der Anwendung der erläuterten Theorie auf den Thermoplast-Tapelegeprozess und die meisten anderen Verarbeitungsverfahren ist der gesamte Fertigungsprozess ein System statischer Komplexität mit zwei einzelnen Systemen statischer Komplexität, der Werkzeugplattform und der Maschine. Zur Herstellung eines Bauteils treten beide Systeme in Verbindung; sie erzeugen eine Komplexität durch Interaktion (K_i) [124].

Auch wenn die bisherige Theorie hilft, Komplexität zu strukturieren, so entzieht sich dieser Begriff immer noch dem Vergleich oder der Quantifizierung. WILSON [122] erarbeitete als erster eine sehr gute, allgemein gültige Definition, indem er seinen

Ansatz auf der Informationstheorie aufbaute. Er ging dazu von einem Kommunikationskanal aus, durch den eine Nachricht gesendet wird. Sein abgeleitetes Postulat ist sehr treffend: "Die Komplexität einer Nachricht ist gleich ihrem Informationsgehalt". Der Ansatz „Informationsgehalt“ wird somit der Ausgangspunkt für die Quantifizierung von Bauteilformkomplexität innerhalb des neuen Modells bilden (Bild 5.2).

In dem neuen Ansatz dieser Arbeit ist die Basis zur Beschreibung und Quantifizierung der Bauteilformkomplexität der Informationsgehalt des Produktionssystems. Dieses besteht aus den Systemen Bauteil/Werkzeugplattform und Maschine/Handhabung. Das Bauteil bzw. die seine Geometrie repräsentierende Werkzeugplattform besitzt eine absolute Komponente der Komplexität (K_s). Sie wird definiert mit den Parametern Bauteilgeometrie, lokale Verstärkungen und dem Faserwinkel. Bauteil-bezogene Parameter wie die Verarbeitungstemperatur in Abhängigkeit vom eingesetzten Material haben keinen Einfluss auf den Komplexitätsgrad, da sie als konstante Prozesseingangsgrößen direkt die Grundverarbeitungsgeschwindigkeit v_0 beeinflussen. Ebenso haben Parameter wie Oberfläche bzw. Farbe des Bauteils lediglich einen Einfluss auf die vorliegende Anlagentechnik oder nachgeschalteten Prozessschritte.

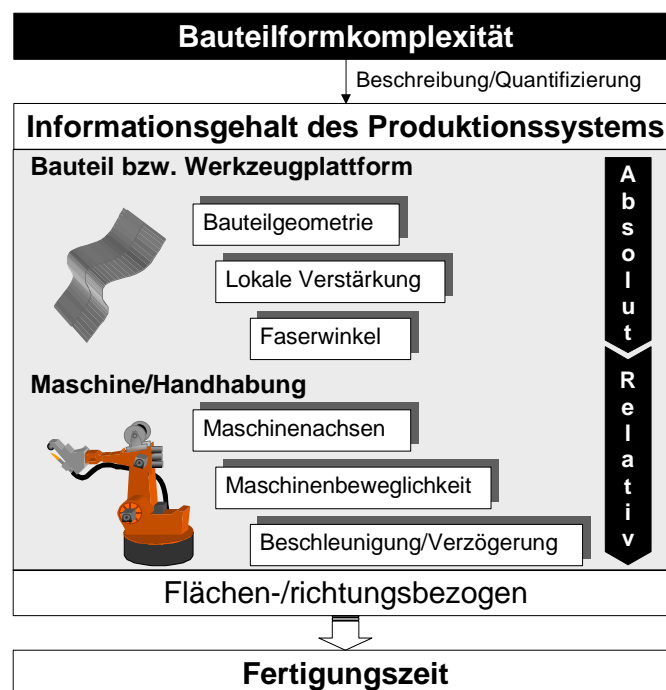


Bild 5.2: Systemspezifischer Zusammenhang zwischen Bauteilformkomplexität und Fertigungszeit

Bisher beschränken sich Ausführungen nur auf das System Bauteil/Werkzeugplattform. Dies reicht auch vollkommen aus, um die Bauteilformkomplexität zu definieren. Die absolute Komplexität der Maschine kann vernachlässigt werden. Allerdings hat die vorherige Analyse des Begriffs gezeigt, dass die Bauteilformkomplexität durch den Herstellungsprozess mit dem System Maschine/Handhabung interagiert (K_i) und demnach systemspezifisch zu betrachten ist. Für sich betrachtet kann die absolute Bauteilformkomplexität nur Vergleichen oder Beschreibungen dienen. Im Hinblick auf die Fertigungszeit erhält die Bauteilformkomplexität erst ihre Bedeutung in Verbindung mit der Maschine/Handhabung. Das System Maschine/Handhabung erweitert damit die bisherige Betrachtung um eine relative Komponente der Komplexität. Sie wird definiert mit den Parametern Maschinenachsen, Maschinenbeweglichkeit und Beschleunigung bzw. Verzögerung. Innerhalb des Produktionssystems ist die Bauteilformkomplexität bezogen auf die Fläche und die Arbeitsrichtung eine relative Größe.

Zur Vergegenwärtigung der Relativität von Bauteilformkomplexität dient ein fiktives Bauteil, das im RTM- oder Handlaminier-/Autoklavverfahren hergestellt werden kann. Das Bauteil besitzt für sich betrachtet die gleiche Geometrie, Funktion und Leistung. Dennoch bewirken unterschiedliche Merkmale eine verfahrensspezifische Verlangsamung des Fertigungsprozesses im Vergleich zu einer ebenen Platte. Während beim RTM-Verfahren Parameter wie Einlegen der Fasern, Position der Angüsse und somit die realisierbare Fließfront(-geschwindigkeit) verlangsamernd wirken, sind dies beim Handlaminieren/Autoklavprozess eher Faktoren der Handhabung.

Dies bedeutet für die Entwicklung eines geeigneten Modells zur Abschätzung von Zykluszeiten, dass beide Systeme Bauteil/Werkzeugplattform und Maschine/Handhabung sowie deren Interaktion mitberücksichtigt werden müssen. Frühere Studien [19, 122, 123, 125, 126, 127] haben sich lediglich auf das System Bauteil/Werkzeug konzentriert und andere Systeme/Interaktionen vernachlässigt. Nachstehend soll daher ein Modell zur Bestimmung der Zykluszeit abgeleitet werden, das beide Systeme und deren Interaktion berücksichtigt.

5.3 Modell für die Komplexitäts-basierte Abschätzung der Fertigungszeit

In den vorangegangenen Kapiteln werden die grundlegenden Theorien und Ansätze vorgestellt. Sie erläutern das vorliegende Problem und die kritischen Parameter/Faktoren, die für ein geeignetes Modell erforderlich sind. Im Vergleich zu den meisten physikalischen Parametern wie Größe, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung ist der abstrakte Parameter Komplexität schwerer in ein Modell zu implementieren. Der wichtigste Schritt für die modellmäßige Betrachtung von Komplexität ist, sie messbar zu machen.

5.3.1 Bisherige Theorien und Annahmen zur Messung von Komplexität

Das ACCEM Modell "basiert auf der Komplexität von Ablegeinkrementen, die aus verschiedenen Gleichungen bestehen, welche auf Basis der Übereinstimmung von Parametern mit Daten, die zur Herstellung von Bauteilen mit geraden, kreisförmigen und gekrümmten Kurven eine zusätzliche Zeit benötigen" [123]. In einem anderen Ansatz basiert PUGH sein Modell auf der Annahme, dass Komplexität der Grad der Diskontinuität in einem Bauteildesign wiedergeben muss. PEARCE nutze dagegen einen wissensbasierten Ansatz, um die Herstellungskosten für Spritzgusswerkzeuge zu modellieren. Er bemerkte, dass die Werkzeugkomplexität auf sechs Parametern basiert, wobei die Anzahl der erforderlichen Detailzeichnungen den besten Skalierungsfaktor darstellt. BOOTHROYD und DEWHURST hatten die Aufgabe, die verschiedenen Handhabungszeiten, die für das Hinzufügen eines Teils zu einer Montagegruppe erforderlich sind, zu modellieren. Dazu wird bei der Montage eines Bauteils der Vollständigkeitsgrad der Rotationssymmetrie um eine Achse des Bauteils senkrecht zur Einfügeachse (ξ) und der Rotationssymmetrie um die Einfügeachse (ϖ) gemäß der Gleichung 5.1 zur Bestimmung der Komplexität herangezogen [123].

Gleichung 5.1: BOOTHROYDs und DEWHURSTs Komplexitätsmaß

$$C_a = \xi + \varpi$$

Diese Ansätze haben gemeinsam, dass sie die Bauteilparameter clustern, Variablen für diese Cluster benennen und schließlich eine Formel auf Basis von statistischen Werten aufstellen. Diese Gleichungen ermöglichen mitunter gute Ergebnisse. Sie

sind aber aufgrund der Clusterbildung diskontinuierlich. Den ersten geschlossenen Lösungsansatz stellt die Informationstheorie dar. Die Informationstheorie basiert auf der Annahme eines Kommunikationskanals (Bild 5.3), wobei eine Nachricht von einer Quelle zu ihrem Bestimmungsort gesendet wird.

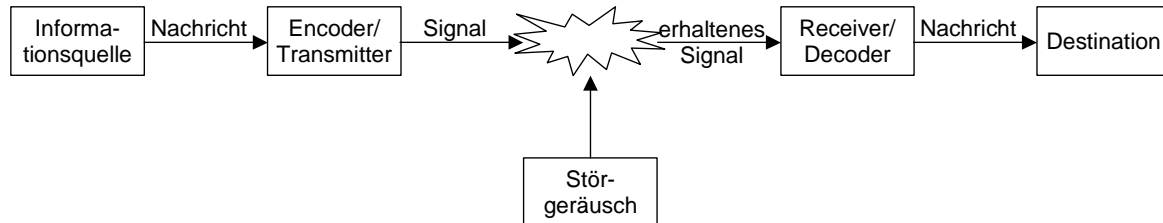


Bild 5.3: Kommunikationskanal

Zwischen diesen beiden Stellen wird die Nachricht zu einem Signal verschlüsselt, eventuell gestört durch ein Störgeräusch und schließlich entschlüsselt. Die Frage ist: Wie groß ist die kleinste mögliche Menge an Information, die als Signal übertragen werden muss, um der gewünschten Nachricht das Erreichen des Bestimmungsortes zu erlauben? Aus diesem Grund ist der Informationsgehalt ein Maß für die Komplexität [122, 128]. Angenommen eine Nachricht enthält N mögliche Symbole, die mit einer Wahrscheinlichkeit von p_i auftreten. Die Gesamtwahrscheinlichkeit dieser Nachricht kann mit p entsprechend der Gleichung 5.2 ausgedrückt werden.

Gleichung 5.2: Wahrscheinlichkeit einer Nachricht

$$p = p_1^{p_1 \cdot N} \cdot p_2^{p_2 \cdot N} \cdot \dots \cdot p_n^{p_n \cdot N}$$

Wenn nun der Informationsgehalt I gleich ist dem Produkt aus N mal dem durchschnittlichen Informationsgehalt \bar{i} , kann die Gleichung entsprechend der Gleichung 5.3 mit Hilfe des Logarithmus weiter transformiert werden.

Gleichung 5.3: Informationsgehalt

$$N \cdot \sum_i p_i \cdot \log_2(p_i) = \log_2(p)$$

$$\Rightarrow I = N \cdot \bar{i} = N \cdot \left(- \sum_i p_i \cdot \log_2(p_i) \right) = -\log_2(p)$$

$$\Rightarrow I = \log_2\left(\frac{1}{p}\right)$$

Der Logarithmus zur Basis 2 wird zur Messung des Informationsgehalts in Bit benutzt. Übertragen auf ein anschauliches Problem bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit der Richtigkeit einer Maschinenbewegung die Strecke der Maschinenbewegung dividiert durch die Toleranz oder Genauigkeit der Maschinenbewegung ist. Folglich kann der Informationsgehalt einer Maschinenbewegung gemäß Gleichung 5.4 beschrieben werden [123, 126].

Gleichung 5.4: Informationsgehalt einer Maschinenbewegung

$$I = \log_2 \left(\frac{\text{Bewegungsstrecke}}{\text{Toleranz}} \right)$$

Darauf basierend entwickelte NEOH [129] ein Modell zur Abschätzung der Zykluszeit, das bereits mehrere Male und zu letzt durch HAFFNER [130] angepasst wurde.

First Order Modell

Bei vielen Herstellungsprozessen ist die Erhöhung der Fertigungszeit direkt abhängig von der Bauteilgröße und -formkomplexität. Um diese Abhängigkeiten zwischen Fertigungszeit und Bauteildesign abzuleiten, werden auf Basis der Prozessphysik Skalierungsgesetze abgeleitet. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Prozess wie das dynamische Modell einer bewegten Masse verhält. Die Beziehung zwischen der Bauteilgröße und der erforderlichen Fertigungszeit wird beschrieben mit dem First Order Model [7]. Gemäß seinem Namen wird es von dem Verhalten eines dynamischen Systems ersten Grades abgeleitet. Integration und einige mathematische Umformungen führen zu einem hyperbolischen Modell (Gleichung 5.5).

Gleichung 5.5: Das hyperbolische First Order Model

$$\frac{t}{\tau} = \sqrt{\left(\frac{x}{v \cdot \tau} + 1 \right)^2 - 1}$$

Für umfangreiche Prozesse, bei denen „x“ die Größenvariable (Länge, Fläche oder Volumen) ist, lässt sich die Fertigungszeit erfolgreich mit nur zwei Faktoren beschreiben: der Prozessrate v (Geschwindigkeit oder Ausbringungsrate) und einer Zeitkonstante τ . Die Zeitkonstante ergibt sich aus einer bauteilbezogenen Regression statis-

tischer Zeitwerte einer Produktion mit den für das Bauteil berechneten Informationsgehalten und quantifiziert somit die Bauteilformkomplexität. Es ist davon auszugehen, dass andere Prozesse ähnliche Parameter aufweisen.

Zum Aufstellen von Skalierungsgesetzen für Komplexität sind Bauteileigenschaften zu identifizieren, die ausgehend vom Bauteil mit dem niedrigsten Formkomplexität den Herstellungsprozess verlangsamen. Für das Drapieren eines Gewebe-Prepregs über ein Werkzeug lässt sich die Komplexität in Deformationsmuster übersetzen. Die einzelnen Faserbahnen des Gewebes im Bauteil werden in zwei Richtungen gekrümmt und geschert.

Bezüglich der Bauteilformkomplexität differenziert NEOH zwischen dem “out of plane angle” θ_n (der von zwei sich schneidenden Ebenen eingeschlossene Winkel) und dem “enclosed shearing angle” θ_g (der von einer Ablegebahn eingeschlossene Scherwinkel). Im Falle des Tapelegens vernachlässigt er jedoch den Out-of-plane-Winkel aufgrund eines zu geringen Einflusses. Zur Quantifizierung der Bauteilformkomplexität werden die Flächenanteile $A_{affected}$ mit dem flächenbezogenen In-plane-shearing-Winkel θ_g multipliziert, alle addiert und schließlich auf die gesamte Bauteilfläche A bezogen (Gleichung 5.6). Der errechnete Wert wird mit Hilfe einer zugehörigen Komplexitätskonstante zur Anpassung der dynamischen Prozesskonstante τ benutzt.

Gleichung 5.6: Berechnung des durchschnittlichen Scherwinkels

$$\bar{\theta}_g = \frac{\sum \theta_{g_i} \cdot A_{affected_i}}{A}$$

Bisher wird dieser durchdachte Ansatz mit guten Ergebnissen zur Modellierung der Prozesszeit eingesetzt. Bei näherer Analyse des derzeitigen Vorgehens zeigen sich jedoch einige Defizite, die bisher nicht ausreichend geklärt wurden:

- NEOH konzentrierte sich auf den In-plane-shearing-Winkel und vernachlässigte den Out-of-plane-Winkel für verschiedene Bauteile, um die Komplexität zu messen. Der In-plane-shearing-Winkel repräsentiert eine Kurve in der Ebene, was bei der Fertigung ein Drehen des TLK bedeutet. Bei den für den Tapelegeprozess in Frage kommenden Bauteilen ist jedoch davon auszugehen, dass nur Radien in der Ebene gelegt werden, die keinen Einfluss auf die Ablegegeschwindigkeit ha-

ben, zumal kleine Radien durch die Drapierbarkeit der Tapes nicht realisiert werden können. Heutige Roboter gewährleisten eine konstante Bahngeschwindigkeit von etwa 2 m/s (120 m/min). Diese Bahngeschwindigkeit ist viel größer als die üblichen und bisher möglichen Ablegegeschwindigkeiten. Eine Reduzierung der Geschwindigkeit ist daher nur im Extremfall denkbar, wenn sich lediglich eine Achse alleine dreht¹⁰. Die sechste Achse des IVW Roboters von Kuka hat eine maximale Achsgeschwindigkeit von 251 °/s bzw. eine Winkelgeschwindigkeit ω von 4,381 1/s. Mit der Beziehung für die Bahngeschwindigkeit $v_B = \omega \cdot r$ lässt sich der Grenzradius r berechnen, ab dem eine Verzögerung des Prozesses erfolgt. Für $v_0 = 10$ m/min ergibt sich ein Grenzradius von 38,04 mm. Die Untersuchungen in Kapitel 4.4.2 ergaben aber schon eine Ondulation des Tapes auf der Kurveninnenseite ab einem Radius von etwa 550 mm für 5 mm breite Tapes. Damit lässt sich zeigen, dass der In-plane-shearing-Winkel unter den gegebenen Prozessbedingungen quasi keine Relevanz für die Zykluszeit hat.

- Das beschriebene Vorgehen gewichtet einen vollständigen Teil der Bauteiloberfläche mit dem gleichen θ_g . Allerdings zeigte GONZALEZ-ZUGASTI [131], dass θ_g sehr schwer vorhersagbar und nicht konstant auf der Bauteiloberfläche ist.
- Die prozessspezifischen Komplexitätskonstanten können nicht berechnet werden, sondern basieren auf einer Schätzung oder auf empirischen Daten.
- Das gesamte Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die erste Ablegebahn durch die Bauteilmitte verläuft. Die Position der ersten Ablegebahn hat somit einen großen Einfluss auf die berechnete bzw. gemessene Komplexität.
- Dieser Ansatz basiert nur auf dem System Bauteil und vernachlässigt die Interaktion mit dem System Maschine.

Gemäß dieser Schlussfolgerungen wird im nachstehenden Kapitel ein neues Modell entwickelt, das bei der Abschätzung der Zykluszeit die Systeme Bauteil und Herstellungsprozess berücksichtigt.

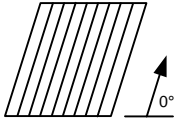
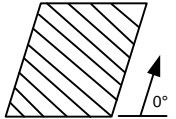
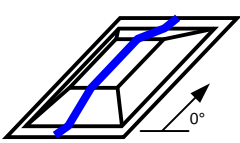
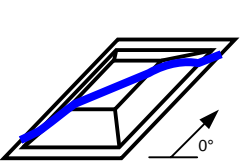
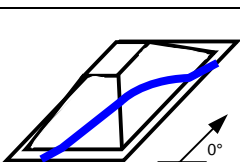
¹⁰ Dies sei eine vereinfachende Annahme, da das Drehen der letzten Roboterachse alleine das Drehen auf einem Punkt darstellt. Die tatsächliche Kinematik des Roboters kann nicht ohne Kenntnis der Steuerungsalgorithmen beschrieben werden.

5.3.2 Modell auf Basis der Prozessunterbrechung

Das Modell zur Abschätzung der Zykluszeit des Thermoplast-Tapelegeprozesses basiert auf den folgenden Annahmen:

- Die Bauteilgröße ist der Hauptskalierungsparameter für die Zykluszeit.
- Die Bauteilformkomplexität hat einen Einfluss auf die Zykluszeit.
- Die Bauteilformkomplexität ist relativ und muss unter Berücksichtigung des gesamten Fertigungssystems betrachtet werden.
- Der Informationsgehalt der Bauteilgeometrie ist ein Maß für Komplexität.
- Ein Drehen des TLK aufgrund gekrümmter Ablegebahnen bewirkt keine Reduzierung der Legegeschwindigkeit. Sowohl die üblichen Legepfade in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie als auch die Drapierbarkeit der Tapes lassen dies nur als Ausnahme zu, so dass dies als Sonderfall, der bisher nicht beim Tapelegen vorkommt, betrachtet und im Modell nicht berücksichtigt wird.
- Die folgenden Prozessparameter sind zu berücksichtigen: Ablegewinkel, Geschwindigkeit, Bedingungen am Bahnanfang und -ende, Ablegebreite, Bauteilformkomplexität und die möglichen Beschleunigungen/Verzögerungen der Maschine.
- Die externe Rotationsachse wird nicht berücksichtigt. Es findet keine Herstellung konvex geschlossener Bauteile statt.
- Die Steuerung der Heizquelle erfolgt geschwindigkeitsabhängig.
- Das Schneiden des Tapes erzeugt keine Verzögerung der Legegeschwindigkeit durch Verwendung eines Schneidpuffers.
- Der Anfangspunkt der nächsten Bahn liegt neben dem Endpunkt der vorangegangenen Bahn.
- Es wird eine Geometrie-adaptive Konsolidierungsrolle verwendet.
- Es gibt eine maschinenspezifische maximale Bahngeschwindigkeit, die unabhängig von der Bahn im Raum und der Anzahl der bewegten Achsen erreicht wird.

Tabelle 5.1: Einfluss von Änderungen von Form und Faserwinkel auf Prozessparameter

Grad der Änderung	Abbildung	Welche Parameter haben sich verändert?
Ebene Platte mit 0° oder 90° Faserwinkel		
Ebene Platte mit anderen Faserwinkeln		<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der Bahnen - Bedingungen am Anfang und Ende der Bahn
3D-Form mit 0° oder 90° Faserwinkel		<ul style="list-style-type: none"> - In-plane-shearing-Winkel - Out-of-plane-Winkel - Verhältnis von Fläche auf projizierte Fläche - Verhältnis von Bahnlänge über projizierter Bahnlänge - Anzahl überfahrener Kanten
3D-Form mit anderen Faserwinkeln		<ul style="list-style-type: none"> - In-plane-shearing-Winkel - Out-of-plane-Winkel - Bedingungen am Anfang und Ende der Bahn - Bedingungen beim Überfahren der Kanten - Anzahl der Bahnen - Anzahl überfahrener Kanten
3D-Form mit höherer Komplexität		<ul style="list-style-type: none"> - In-plane-shearing-Winkel - Out-of-plane-Winkel - Verhältnis von Fläche auf projizierte Fläche - Verhältnis von Bahnlänge über projizierter Bahnlänge - Anzahl überfahrener Kanten - Bedingungen beim Überfahren der Kanten

Zur schrittweisen Analyse des Einflusses der Bauteilform auf deren Herstellung wird nun bei der niedrigsten Formteilkomplexität begonnen und die Komplexität sukzessive erhöht. Zusätzlich werden dabei alle Parameter aufgezeichnet, die von der Änderung der Form und/oder des Faserwinkels beeinflusst werden (Tabelle 5.1).

Im nächsten Schritt erfolgt eine Betrachtung des Tapelegeprozesses selbst. Dazu wird angenommen, dass der Tapelegekopf mit konstanter Geschwindigkeit über eine ebene Werkzeugoberfläche verfährt, wobei er senkrecht auf der Oberfläche orientiert ist. Was bewirkt nun eine Reduzierung der Grundablegegeschwindigkeit v_0 ? In der Regel muss die Ablegegeschwindigkeit reduziert werden, wenn der Kopf auf eine stärkere Geometrieänderung der Oberfläche stößt. Beim Überfahren der (Licht-) Kante, als Schnittlinie/Übergang zweier sich schneidenden Ebenen, muss in Abhängigkeit vom Grad der Geometrieänderung aus folgendem Grund langsamer verfahren werden: Die Maschinenachsen müssen (schnell) verfahren werden, um den TLK an die neue Geometrie anzupassen. Je nach Bedingung kann die maschinenspezifisch begrenzte Bahngeschwindigkeit diesen Adaptionsprozess einschränken. Auf Basis des derzeitigen Stand des Wissen kann nicht beurteilt und daher auch nicht berücksich-

sichtigt werden, ob es trotz Geometrie-adaptiver Rolle potentiell zu Materialbeschädigungen beim Überfahren von Geometrieänderungen kommen kann, was ebenfalls eine Prozess-verlangsamende Wirkung hätte.

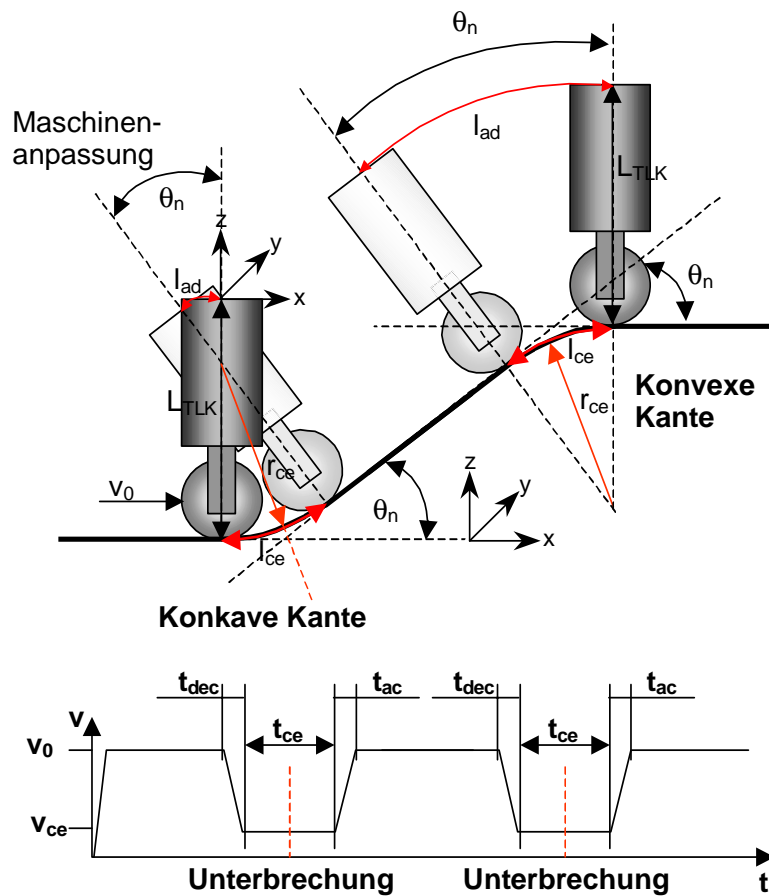


Bild 5.4: Angenommener Ablegeprozess während des Überquerens von Kanten

Bezüglich der Grundablegegeschwindigkeit stellt eine Kante somit eine Unterbrechung des ungestörten Prozesses dar. Bei diesem Ansatz stellt die Anzahl der überquerten Kanten den relevanten Informationsgehalt zur Quantifizierung der Bauteilformkomplexität dar (Bild 5.4).

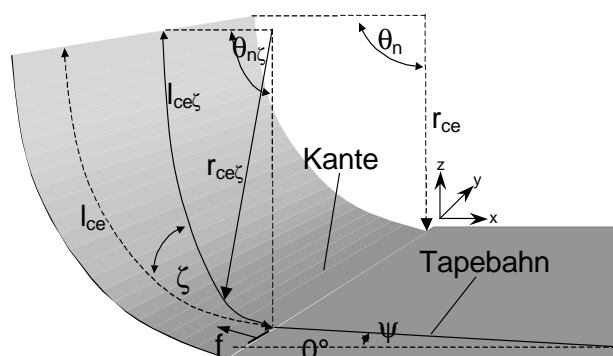


Bild 5.5: Überqueren einer Kante unter einem bestimmten Faserwinkel

Es stellt sich die Frage: Wann liegt eine Geometrieänderung (Kante) vor, die zu einer Verlangsamung des Prozesses führt? Beziehungsweise, ab wann beeinflusst eine Änderung der Bauteilformkomplexität effektiv die Zykluszeit? Betrachtet man dazu das Durchfahren einer Kante, so kann man die Adaptionsbewegung der Maschine und das Abrollen des TLK auf der Werkzeugoberfläche wie folgt in Beziehung bringen, um den Kantengrenzradius zu ermitteln bzw. um den Begriff Kante zu definieren: Während einer Geometrieänderung muss der TLK eine Kante mit dem Radius r_{ce} auf der Länge l_{ce} in Abhängigkeit vom Out-of-plane-Winkel θ_n mit der Geschwindigkeit v_{ce} in der Zeit t_{ce} durchfahren. Um diese Änderung zu ermöglichen, muss die Maschine die Strecke l_{ad} zur Adaption der Orientierung abfahren. Die Adaptionsgeschwindigkeit v_{ad} beträgt höchstens die maximale Maschinengeschwindigkeit $v_{maxMasch}$ und erfolgt in der Zeit t_{ad} , die gleich t_{ce} sein muss. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass das Bild nur das Überqueren einer Kante im 0° -Winkel, also senkrecht zur Kante zeigt. Daher müssen die weiteren Betrachtungen auf der in Bild 5.5 dargestellten Überquerung mit beliebigem Faserwinkel ψ beruhen. Der Überquerungswinkel ist neben dem Faserwinkel auch von der Orientierung der Kante im Raum abhängig. So ist der Überquerungswinkel ζ nur gleich ψ , wenn die Kante senkrecht zur 0° -Achse liegt. Es wird der Fall angenommen, dass auf dem Ausschnitt $\theta_n/360^\circ$ eines zylindrischen Mantels mit dem Radius r_{ce} (dies stellt das dreidimensionale Abbild einer Kante dar) ein Tape im Winkel ζ abgelegt wird. Die Ganghöhe bzw. Steigung dieser Schraubenbahn im Raum ist demnach $\tan\zeta$. Die Schraubenbahn kann durch Gleichung 5.7 dargestellt werden.

Gleichung 5.7: Bahnkurve für beliebige Faserwinkel

$$\vec{x}(t) = (r_{ce} \cdot \cos f, r_{ce} \cdot \sin f, f \cdot \tan \zeta) \quad \text{mit } f \in [0 \dots (2 \cdot \pi \cdot \theta_n / 360^\circ)]$$

Um den effektiven Kantenradius $r_{ce\zeta}$ durch das Überqueren der Kante im Winkel ζ zu ermitteln, muss von dieser Kurve der Krümmungsradius $\phi(s)$ auf Basis der Krümmung $\kappa(s)$ gemäß Gleichung 5.8 berechnet werden.

Gleichung 5.8: Herleitung des Krümmungsradius einer Bahnkurve für beliebige Faserwinkel

$$\kappa(s) = |\ddot{\vec{x}}(s)| = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{ds^2}\right)^2} \quad \text{mit} \quad \frac{ds}{df} = |\dot{\vec{x}}(f)| \Leftrightarrow ds = |\dot{\vec{x}}(f)| df$$

$$\Rightarrow \kappa(s) = \sqrt{\left(\frac{\frac{d^2x}{df^2}}{|\dot{\vec{x}}(f)|^2 df^2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{d^2y}{df^2}}{|\dot{\vec{x}}(f)|^2 df^2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{d^2z}{df^2}}{|\dot{\vec{x}}(f)|^2 df^2}\right)^2}$$

$$\Rightarrow |\dot{\vec{x}}(f)|^2 = \sqrt{(-r_{ce} \cdot \sin f)^2 + (r_{ce} \cdot \cos f)^2 + (\tan \zeta)^2}^2 = r_{ce}^2 + \tan^2 \zeta$$

$$\Rightarrow \frac{d^2x}{df^2} = -r_{ce} \cdot \cos f \quad \frac{d^2y}{df^2} = -r_{ce} \cdot \sin f \quad \frac{d^2z}{df^2} = 0$$

$$\Rightarrow \kappa(s) = \sqrt{\left(\frac{-r_{ce} \cdot \cos f}{r_{ce}^2 + \tan^2 \zeta}\right)^2 + \left(\frac{-r_{ce} \cdot \sin f}{r_{ce}^2 + \tan^2 \zeta}\right)^2} = \sqrt{\frac{r_{ce}^2 \cdot \cos^2 f + r_{ce}^2 \cdot \sin^2 f}{(r_{ce}^2 + \tan^2 \zeta)^2}} = \frac{r_{ce}}{r_{ce}^2 + \tan^2 \zeta}$$

$$\Rightarrow \varphi(s) = \frac{1}{\kappa(s)} = \frac{r_{ce}^2 + \tan^2 \zeta}{r_{ce}} = r_{ce} \zeta$$

Mit der Beziehung für $r_{ce}\zeta$ lassen sich allgemein gültig die resultierenden Radien für eine Kurvenbahn ermitteln. Jedoch muss im Vergleich zu den Ausführungen zu Bild 5.4 beim Überqueren einer Kante mit $\zeta \neq 0^\circ$ berücksichtigt werden, dass nicht nur eine Adaptierung der Maschine für den Kantenradius sondern zusätzlich eine seitliche Ausgleichsbewegung des Werkzeugaufnahmepunktes des Roboters von $l_{ce} \cdot \tan \zeta$ erforderlich ist¹¹. Diese Ausgleichsbewegung gewährleistet, dass der TLK senkrecht auf den Konsolidierungspunkt orientiert ist. Gemäß der Gleichung 5.9 lässt sich nun der Kantengrenzradius $r_{ce\zeta, \text{grenz}}$ für beliebige Ablegewinkel ableiten.

¹¹ Hierbei ist nicht klar, ob die Anpassungsbewegung für den Radius oder zur Seite bestimmend ist, wobei beide Bewegungen zeitgleich abgeschlossen sein müssen. Um beiden Anpassungsbewegungen Rechnung zu tragen, werden beide Bewegungen additiv berücksichtigt.

Gleichung 5.9: Herleitung des Kantengrenzradius

$$l_{ce\zeta} = \frac{l_{ce}}{\cos \zeta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} ; \quad t_{ce\zeta} = \frac{l_{ce\zeta}}{v_{ce\zeta}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta \cdot v_{ce\zeta}}$$

$$l_{ad\zeta} = \frac{l_{ad}}{\cos \zeta} + l_{ce} \cdot \tan \zeta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot (L_{TLK} - r_{ce} + r_{ce} \cdot \sin \zeta)}{360^\circ \cdot \cos \zeta}$$

$$t_{ad\zeta} = \frac{l_{ad\zeta}}{v_{ad\zeta}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot (L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})}{360^\circ \cdot \cos \zeta \cdot v_{ad\zeta}}$$

$$\Rightarrow t_{ce\zeta} = t_{ad\zeta} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta \cdot v_{ce\zeta}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot (L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})}{360^\circ \cdot \cos \zeta \cdot v_{ad\zeta}}$$

$$\Leftrightarrow v_{ce\zeta} = \frac{v_{ad} \cdot r_{ce}}{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})}$$

$$\Rightarrow v_0 = v_{ce\zeta} \quad \Leftrightarrow \quad v_0 = \frac{v_{ad} \cdot r_{ce}}{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})} \quad \Leftrightarrow \quad r_{ce} = \frac{v_0 \cdot L_{TLK}}{v_{ad} + v_0 - v_0 \cdot \sin \zeta}$$

$$\Rightarrow r_{ce\zeta, \text{grenz}_{konkav}} = \frac{v_0 \cdot L_{TLK}}{v_{\max \text{ Masch}} + v_0 - v_0 \cdot \sin \zeta} \quad \text{analog : } r_{ce\zeta, \text{grenz}_{konvex}} = \frac{v_0 \cdot L_{TLK}}{v_{\max \text{ Masch}} - v_0 - v_0 \cdot \sin \zeta}$$

Wird $r_{ce\zeta} < r_{ce\zeta, \text{grenz}_{konkav}}$ bzw. $r_{ce\zeta} < r_{ce\zeta, \text{grenz}_{konvex}}$ tritt eine Verlangsamung des Prozesses ein und es gilt für die Kantengeschwindigkeit:

Gleichung 5.10: Berechnung der Kantengeschwindigkeit

$$v_{ce\zeta, \text{konkav}} = \frac{v_{\max \text{ Masch}} \cdot r_{ce}}{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})} ; \text{analog : } v_{ce\zeta, \text{konvex}} = \frac{v_{\max \text{ Masch}} \cdot r_{ce}}{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta + r_{ce})}$$

Entsprechend den Gleichungen hat der Einsatz von Maschinen mit höherer Maximalgeschwindigkeit eine stark degressive Wirkung auf den Kantengrenzradius. Eine Änderung der Ablegegeschwindigkeit oder der Tapelegekopflänge L_{TLK} wirken sich fast linear auf $r_{ce\zeta, \text{grenz}}$ aus. Das bedeutet im Falle von L_{TLK} , dass ohne Änderung der Anlagentechnik oder Optimierung der Prozessführung der Kantengrenzradius durch einen kürzeren TLK gesenkt werden kann. Dies ermöglicht einen schnelleren Prozess und bedeutet indirekt eine Reduzierung der Komplexität des Gesamtsystems. Für das Beispiel des IVW Roboters mit $v_{\max \text{ Masch}} = 120 \text{ m/min}$, $v_0 = 10 \text{ m/min}$ und

$L_{TLK} = 0,7$ m ergeben sich ein konkaver bzw. konvexer Kantengrenzradius von 53,8 bzw. 63,6 mm. Diese Werte zeigen zum einen, dass die hergeleiteten Beziehungen für den Kantengrenzradius realistische Werte im Vergleich zu den übrigen Prozessgrößen liefern und zum anderen, dass eine Verlangsamung des Prozesses schon bei relativ weichen Geometrieübergängen auftritt. Hinsichtlich der Machbarkeit ist zusätzlich zu beachten, dass ein Bauteil-Radius überhaupt nur überquert werden kann, wenn der Radius der Konsolidierungsrolle kleiner ist.

Zur Berücksichtigung der Überquerung einer Kante mit $\zeta \neq 0^\circ$ ist der Winkel $\theta_{n\zeta}$ entsprechend der nachstehenden Beziehungen zu berechnen.

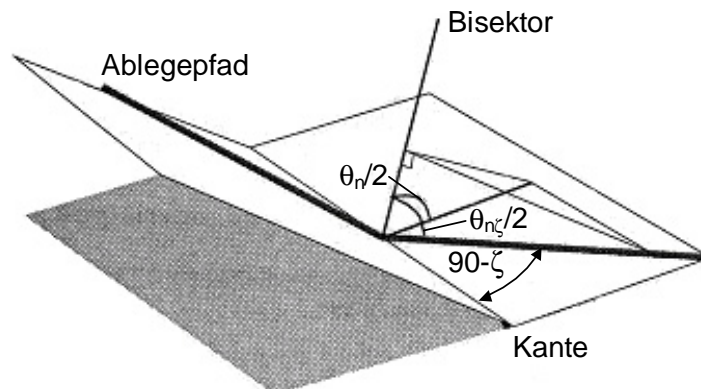


Bild 5.6: Berechnung des Out-of-plane-Winkels im Winkel ζ [126]

Gleichung 5.11: Out-of-plane-Winkel im Winkel ζ

$$\theta_{n\zeta} = 180 - \arccos\left(\sin(90 - \zeta) \cdot \cos\left(\frac{\theta_n}{2}\right)\right)$$

Nach der Definition des Komplexitätsparameters kann ein Modell für die Zykluszeit des Tapelegeprozesses abgeleitet werden. Dazu ist die Zykluszeit in ihre Bestandteile auf Basis der vorangegangenen Überlegungen zerlegt (Gleichung 5.12).

Gleichung 5.12: Zusammensetzung der Zykluszeit für das Tapelegen

$$t_p = (\text{flächenbezogene Ablegezeit} + \text{Komplexität} + \text{Totzeit}) / (1 - \text{Maschinenstillstand})$$

$$\text{flächenbezogene Ablegezeit} = f(\text{Verfahrlänge} / v_0)$$

$$\text{Verfahrlänge} = f(\text{Fläche} / \text{Ablegebreite})$$

$$\text{Komplexität} = f(v_0 / \text{Anzahl der Verz., Beschl.} / \text{Länge der Verlangsamung} / \text{Grad der Verz., Beschl.})$$

$$\text{Anzahl der Verz., Beschl.} = f(\text{Anzahl der überquerten Kanten})$$

$$\text{Anzahl der überquerten Kanten} = f(\text{Form} / \text{Ablegebreite} / \text{Faserwinkel})$$

$$\text{Länge der Verlangsamung} = f(\text{Form} / \text{Faserwinkel})$$

$$\text{Grad der Verz., Beschl.} = f(\text{Reduzierte Geschwindigkeit} / \text{Legkopfkonstruktion})$$

$$\text{Reduzierte Geschwindigkeit} = f(\text{Anzahl der anzupassenden Inkremente})$$

$$\text{Anzahl der anzupassenden Inkremente} = f(\text{out - of - plane - Winkel} / \text{Legkopfkonstruktion})$$

$$\text{Totzeit} = f(\text{Anzahl der Bahnen} / \text{An-, Absetzen} / \text{Tape fördern} / \text{Positionieren} / \text{Orientieren})$$

$$\text{Maschinenstillstand} = f(\text{Prozessbeherrschung} / \text{Technologiereife} / \text{Qualitätsmanagement})$$

Die Berechnung der flächenbezogenen Ablegezeit basiert auf der Annahme, dass eine vorliegende Fläche A ohne Unterbrechungen und Verzögerungen mit einer Ablegegeschwindigkeit v_0 und einer Ablegebreite w belegt wird. Demnach berechnet sie sich aus Gleichung 5.13.

Gleichung 5.13: Berechnung der Bauteilfläche-bezogenen Zykluszeit

$$t_A = A / (v_0 \cdot w)$$

Die Verspätung durch die Bauteilformkomplexität setzt sich aus der Anzahl der überquerten Kanten N_{ce} mal der dafür benötigten zusätzlichen Zeit zusammen. Die Ableitung der Anzahl überquerrter Kanten ist insofern aufwendig, als dass die Fälle der unterschiedlichen Faserwinkel und Kantenorientierungen genau zu unterscheiden sind und deshalb jede Kante individuell betrachtet werden muss. Dabei wird die Kantenlänge jeweils durch die Ablegebreite (in Abhängigkeit vom Überquerungswinkel) w_{ce} geteilt (Gleichung 5.14).

Gleichung 5.14: Berechnung der Überquerungsbreite

$$w_{ce} = w / \cos \zeta$$

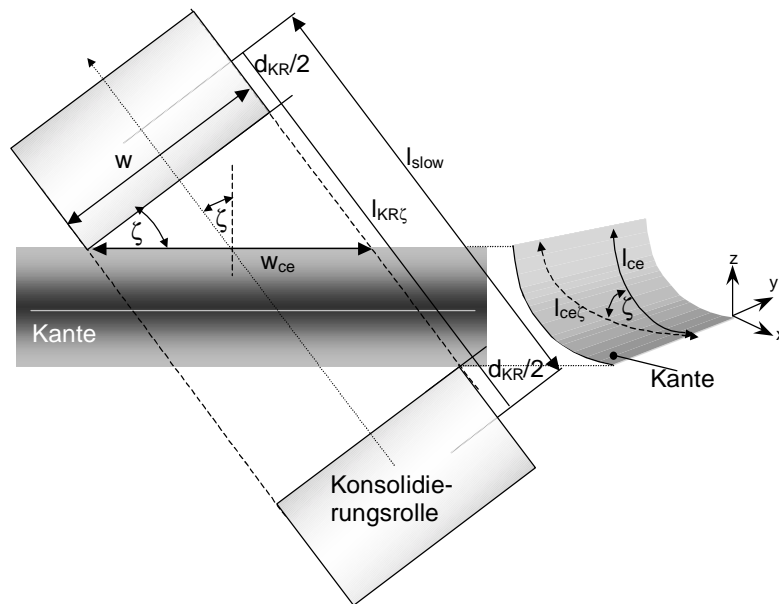


Bild 5.7: Überqueren einer Kante unter einem bestimmten Faserwinkel

Um das Verhalten dieses Parameters zu verdeutlichen ist in Bild 5.8 anhand des dort abgebildeten Beispielbauteils die Veränderung von N_{ce} in Abhängigkeit vom Faserwinkel und der Bauteilgröße dargestellt. Bei der Änderung der Bauteilgröße sind alle Kantenlängen proportional mitverändert.

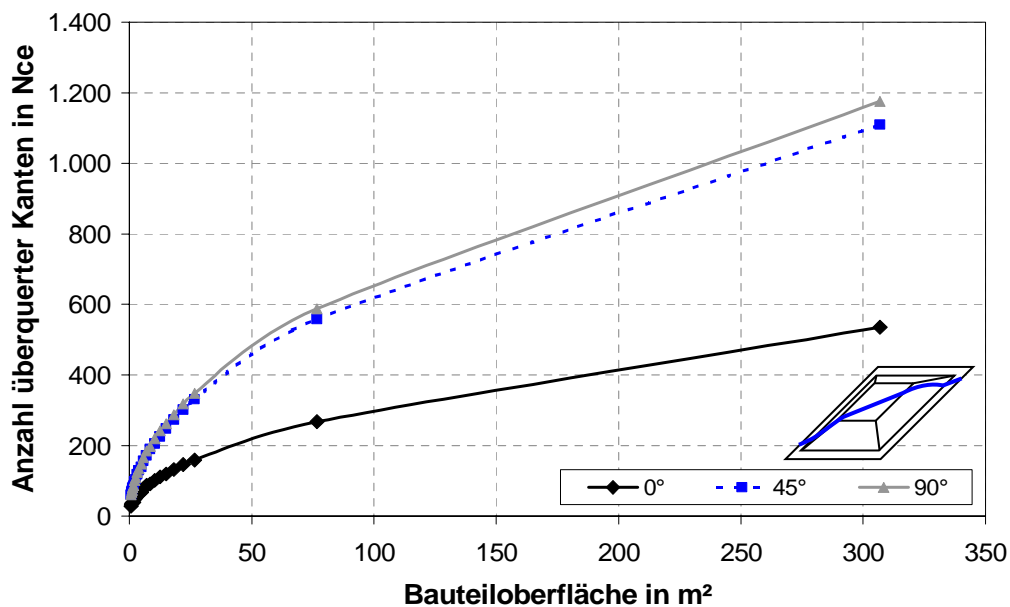


Bild 5.8: Verhalten von N_{ce} in Abhängigkeit vom Faserwinkel und der Bauteilgröße

Als nächsten Schritt gilt es, die Strecke, die mit langsamerer Geschwindigkeit gefahren wird, zu erfassen. Gemäß Bild 5.7 ist diese abhängig von Kantenradius, Über-

querungswinkel ζ und Durchmesser der Konsolidierungsrolle d_{KR} . ζ ist individuell an der Kante zu bestimmen. Es wird davon ausgegangen, dass die niedrigere Kanten-
geschwindigkeit (v_{ce}) schon erreicht sein muss, wenn die Rolle mit dem Durchmesser d_{KR} in der Draufsicht in die Kante einfährt, was dem Abstand $d_{KR}/2$ entspricht. Die niedrigere Geschwindigkeit wird beibehalten, bis die Konsolidierungsrolle wieder aus der Kante ausfährt. Entsprechend der Darstellung können nun die Beziehungen für die Überquerungslänge l_{slow} und -dauer $t_{ce\zeta}$ abgeleitet werden (Gleichung 5.15, Gleichung 5.16).

Gleichung 5.15: Überquerungslänge

$$l_{ce\zeta} = \frac{l_{ce}}{\cos \zeta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta}; \quad l_{KR\zeta} = 2 \cdot \left(\frac{w}{2} \cdot \tan \zeta \right) + l_{ce\zeta} = w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta}$$

$$\Rightarrow l_{slow} = l_{KR\zeta} + d_{KR} = w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} + d_{KR}$$

Gleichung 5.16: Überquerungsdauer

$$t_{ce\zeta, konkav} = \frac{l_{slow}}{v_{ce\zeta, konkav}} \Leftrightarrow t_{ce\zeta, konkav} = \left(w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} + d_{KR} \right) \cdot \left(\frac{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})}{v_{\max Masch} \cdot r_{ce}} \right)$$

$$\Rightarrow \text{analog: } t_{ce\zeta, konvex} = \left(w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} + d_{KR} \right) \cdot \left(\frac{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta + r_{ce})}{v_{\max Masch} \cdot r_{ce}} \right)$$

Um die Prozessverspätung $\Delta t_{ce\zeta}$ aufgrund der Kantenüberquerung zu ermitteln, muss von der Überquerungsdauer der Zeitbedarf für das Zurücklegen der gleichen Strecke mit v_0 abgezogen werden (Gleichung 5.17).

Gleichung 5.17: Prozessverspätung während der Kantenüberquerung

$$\Delta t_{ce\zeta, konkav} = \frac{l_{slow}}{v_{ce\zeta, konkav}} - \frac{l_{slow}}{v_0}$$

$$\Leftrightarrow \Delta t_{ce\zeta, konkav} = \left(w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} + d_{KR} \right) \cdot \left(\left(\frac{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta - r_{ce})}{v_{\max Masch} \cdot r_{ce}} \right) - \frac{1}{v_0} \right)$$

$$\Rightarrow \text{analog: } \Delta t_{ce\zeta, konvex} = \left(w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_n \cdot r_{ce}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} + d_{KR} \right) \cdot \left(\left(\frac{(L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta + r_{ce})}{v_{\max Masch} \cdot r_{ce}} \right) - \frac{1}{v_0} \right)$$

Zusätzlich zur bereits beschriebenen Verlangsamung entsteht noch eine Verlangsamung durch die Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen in Abhängigkeit von der maschinenspezifischen Beschleunigung/Verzögerung a vor und nach der Kantenüberquerung. Gleichung 5.18 zeigt die Beziehungen auf Basis von Bild 5.4.

Gleichung 5.18: Verspätung durch Verzögerung oder Beschleunigung

$$t_a = \frac{\Delta v}{a} = \frac{v_0 - v_{ce}}{a}; \quad s_a = \frac{\Delta v^2}{2 \cdot a} = \frac{(v_0 - v_{ce})^2}{2 \cdot a}$$

benötigte Zeit mit v_0 für die Verzögerungsstrecke :

$$t_0 = \frac{s_a}{v_0} = \frac{(v_0 - v_{ce})^2}{2 \cdot a \cdot v_0}$$

Zeitdifferenz zwischen Verzögerungsdauer und der Dauer bei v_0 für s_a :

$$\Delta t_a = t_a - t_0 = \frac{v_0 - v_{ce}}{a} - \frac{(v_0 - v_{ce})^2}{2 \cdot a \cdot v_0} = \frac{v_0^2 - v_{ce}^2}{2 \cdot a \cdot v_0} = \frac{v_0^2 - \left(\frac{v_{\max \text{ Masch}} \cdot r_{ce}}{L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta \mp r_{ce}} \right)^2}{2 \cdot a \cdot v_0}$$

Die Verspätung durch Beschleunigung/Verzögerung entsteht zweifach bei jeder Kantenüberquerung. Die gesamte Verspätung für den Prozess aufgrund der Kantenüberquerung errechnet sich individuell für jede Kante j , da eine Abhängigkeit zwischen Out-of-plane-Winkel, Kantenposition auf der Bauteiloberfläche, Kantenradius und Faserwinkel besteht (Gleichung 5.19).

Gleichung 5.19: Gesamte Verspätung des Prozesses durch das Überqueren von Kanten

$$\Rightarrow \Delta t_{ce\zeta, ges} = \sum_j \left(N_{ce_j} \cdot \left(\Delta t_{ce\zeta_j} + 2 \cdot \Delta t_{a_j} \right) \right)$$

$$\Leftrightarrow \Delta t_{ce\zeta, ges} = \sum_j N_{ce_j} \cdot \left[\left(w \cdot \tan \zeta + \frac{2 \cdot \pi \cdot \theta_{n_j} \cdot r_{ce_j}}{360^\circ \cdot \cos \zeta} + d_{KR} \right) \cdot \left(\left(\frac{L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta \mp r_{ce_j}}{v_{\max \text{ Masch}} \cdot r_{ce_j}} \right) - \frac{1}{v_0} \right) + \frac{v_0^2 - \left(\frac{v_{\max \text{ Masch}} \cdot r_{ce_j}}{L_{TLK} + r_{ce} \cdot \sin \zeta \mp r_{ce_j}} \right)^2}{a \cdot v_0} \right]$$

Ein weiterer Bestandteil des Modells ist die Totzeit (t_{dead}). Sie setzt sich zusammen aus den Einzelzeiten: Tape fördern, Positionieren/Orientieren des TLK. t_{dead} fällt jeweils einmal bzw. die Verspätung durch Verzögern/Beschleunigen $v_0/(2 \cdot a)$ zwei mal pro Bahn an. Entscheidender Faktor ist die Anzahl der Bahnen. Die Totzeit ist dem-

nach unabhängig von der Länge der Bahnen. Gleichung 5.20 zeigt die Berechnung der Anzahl der Bahnen für ein Bauteil (maximale Kantenlängen L_0 , W_0) [129].

Gleichung 5.20: Anzahl der Bahnen für ein Bauteil

$$n_s = \frac{L_0 \cdot \sin \psi + W_0 \cdot \cos \psi}{w}$$

Abschließend ist der Maschinenstillstands-Anteil r_{down} mit einzubeziehen. LAND [19] berichtet von einem durchschnittlichen Maschinenstillstandsanteil von 44 %, wohingegen EVANS von 30 % ausgeht [31]. Ursachen für Maschinenstillstände können Rüstvorgänge, Beseitigen von Material-/Maschinenfehlern und Reinigungs- bzw. Wartungsarbeiten sein. Durch Zusammenführen aller Einzelkomponenten erhält man die in Gleichung 5.21 dargestellte Beziehung zur Berechnung der Komplexitäts-basierten Zykluszeit. Zur Berechnung sind die in Gleichung 5.8 bis Gleichung 5.20 dargestellten Beziehungen einzusetzen.

Gleichung 5.21: Komplexitäts-basiertes Modell zur Abschätzung der Zykluszeit

$$t_p = \sum_{i=1}^{N_L} \frac{\frac{A}{w \cdot v_0} + \sum_j \left(N_{ce_j} \cdot \left(\Delta t_{ce\zeta, ges_j} + 2 \cdot \Delta t_{a_j} \right) \right) + n_s \cdot \left(t_{dead} + \frac{v_0}{a} \right)}{1 - r_{down}}$$

Aufgrund der Modellherleitung und Vielschichtigkeit der Betrachtung bietet es sich an, für das Vorgehen bei der Berechnung ein Flussdiagramm zu erstellen. Anhand des Flussdiagramms soll die Anwendung des Modells auf beliebige Bauteile ermöglicht werden (Bild 5.9).

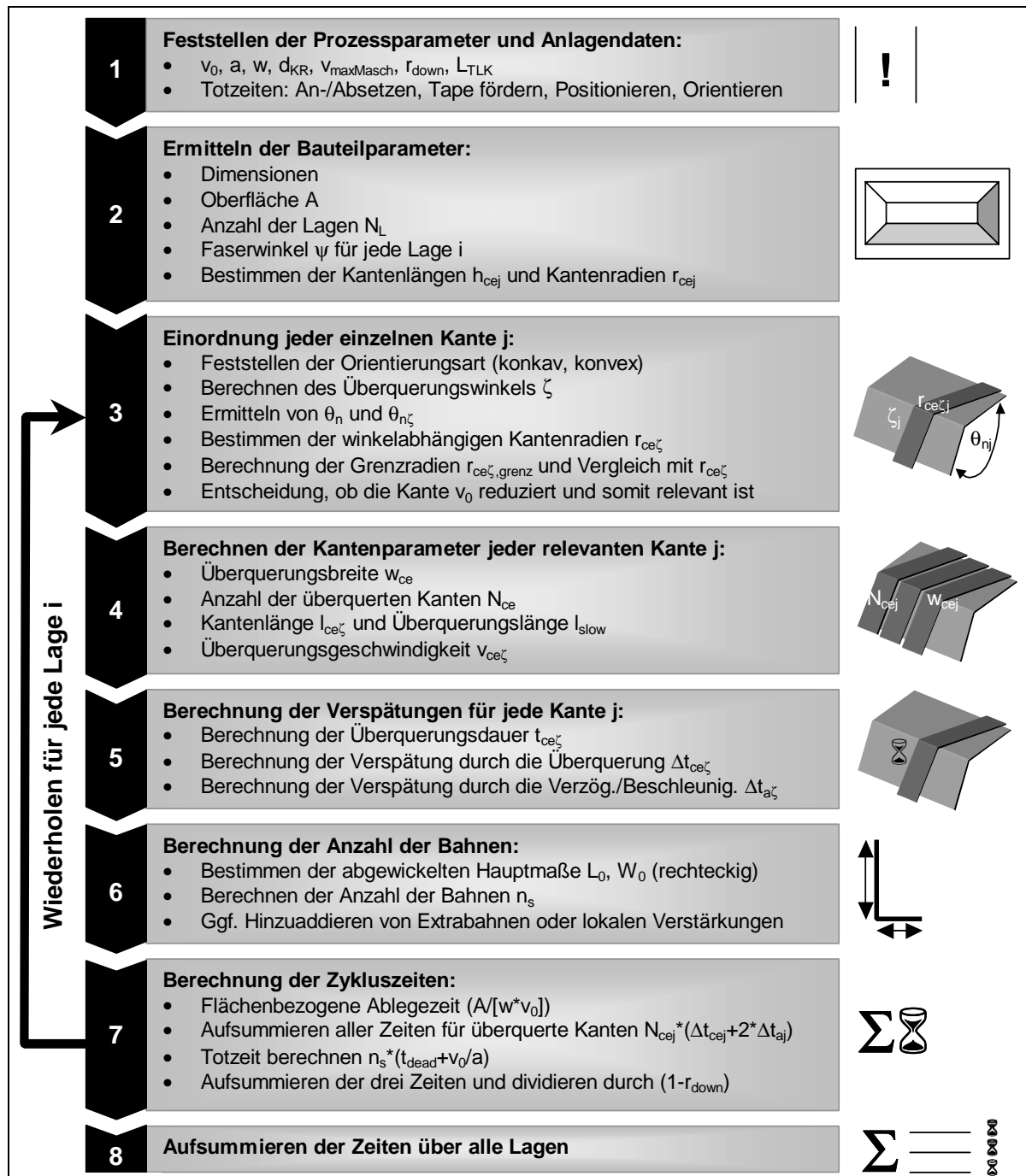


Bild 5.9: Flussdiagramm für die Anwendung des Modells

5.4 Anwendung des Modells

Das Modell kann neben der Berechnung von Zykluszeiten für Bauteile auch zur Unterstützung von strategischen Entscheidungen eingesetzt werden. Dabei ist vorteilhaft, dass das Modell sowohl für das Duroplast- als auch Thermoplast-Tapelegen eingesetzt werden kann, da beide Verfahren hinsichtlich der Kinematik gleich sind.

Darüber hinaus verschafft es dem Anwender ein gute Kenntnis über die Produkt- und Verfahrenseigenschaften. Beispielhaft soll an dieser Stelle ein Vergleich der Zykluszeiten zwischen Duroplast- und Thermoplast-Tapelegen erfolgen. Bei einem Vergleich dieser beiden Verfahren stellt sich stets die Frage, welches Verfahren schnellere Zykluszeiten ermöglicht. Die durchschnittliche Ablegegeschwindigkeit des Thermoplast-Tapelegens ist zwar aufgrund der online Konsolidierung geringer, jedoch entfällt dafür der zeitaufwendige Autoklavzyklus.

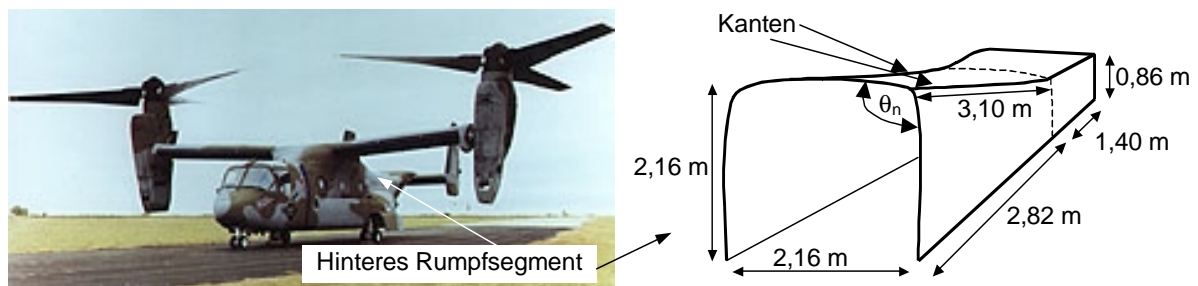


Bild 5.10: Hinteres Rumpfsegment des V-22 und die Abmessungen

Als Beispiel-Bauteil wird das hintere Rumpfsegment des Senkrechtstarters V-22 benutzt, das in [12, 24, 132] beschrieben ist. In Bild 5.10 sind das Bauteil und seine Abmessungen dargestellt. Darauf basierend lassen sich die Zykluszeiten für ein 16-lagiges Laminat mit einem Faserwinkel von $\pm 45^\circ$ für beide Verfahren berechnen. Der Autoklavzyklus wird mit 6 h angenommen. Für den Kantenradius werden mangels Daten 50 mm angenommen. Die vorgegebenen und berechneten Rahmendaten sind in Anhang F aufgelistet. Das Ergebnis und die für die Fertigung herrschenden Bedingungen sind in Bild 5.11 dargestellt. Die Grafik beantwortet die Frage: Wie hoch muss die Ablegegeschwindigkeit des Thermoplast-Tapelegens sein, damit der Prozess mindestens so schnell ist wie das Duroplast-Tapelegen? Bei einer Ablegegeschwindigkeit v_0 von 10 m/min im Duroplast-Tapelegen [31] sind beim Thermoplast-Tapelegen lediglich 6,2 m/min erforderlich. Zu beachten ist, dass hier konservative Werte für die Modellierung angesetzt werden. Normalerweise ist beim Duroplast-Tapelegen aufgrund der materialspezifischen Verschmutzung mit einer deutlich höheren Stillstandszeit als beim Thermoplast-Tapelegen zu rechnen.

Der Vergleich zeigt neben der Anwendbarkeit des Modells aber auch, dass der Einsatz des Thermoplast-Tapelegens aus Sicht der Fertigungsplanung kein Nachteil sein muss. Die Realisierung von 6 – 7 m/min im Thermoplast-Tapelegen mit voll-

ständig konsolidiertem Material sollte zukünftig mit weiteren Prozessverbesserungen erreichbar sein.

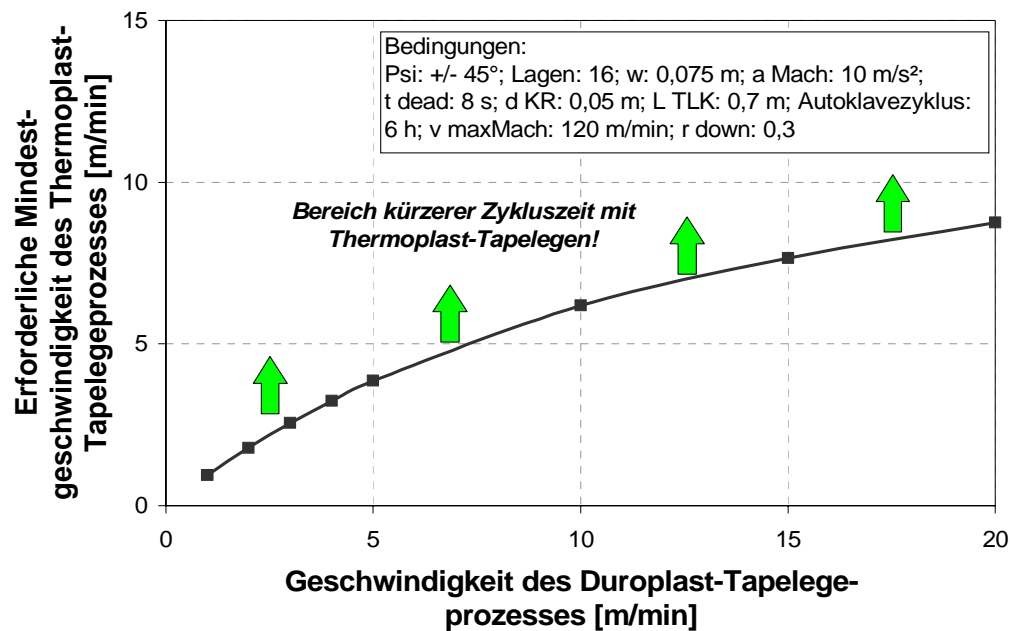


Bild 5.11: Vergleich der Zykluszeiten von Duroplast- und Thermoplast-Tapelegen

Die Validierung des Modells kann erst zukünftig auf Basis von empirischen Daten erfolgen. Derzeit stehen für das Thermoplast-Tapelegen aufgrund der in dieser Arbeit beschriebenen Probleme keine empirischen Daten zur Verfügung. Ebenso liegen die Produktions- und Bauteildaten von den im Duroplast-Tapelegen gefertigten Bauteilen nur unvollständig vor, so dass eine Modellierung dieser Bauteile nicht möglich ist bzw. mit vielen Annahmen und demnach Unsicherheiten verbunden wäre.

Ein weiterer Nutzen des Modells ist seine Einsetzbarkeit für die fertigungsgerechte Konstruktion. So können z.B. in Abhängigkeit von den vorliegenden Maschinen- und Prozessdaten die Radien des zu fertigenden Bauteils so gewählt werden, dass der Kantengrenzradius möglichst nicht unterschritten und der Prozess nur minimal verlangsamt wird. Umgekehrt können auf Basis des Modells auch anlagentechnische Optimierungen erfolgen, um die Bauteil-bezogene Zykluszeit zu senken.

Hierbei stellt sich die Frage nach dem Einfluss der einzelnen Parameter auf den Ablegeprozess. Daher werden für die Fertigung des gewählten Bauteils im Thermoplast-Tapelegen die Parameter maximale Maschinenbeschleunigung, Tapelegekopfgröße, Totzeit, maximale Bahngeschwindigkeit der Maschine, Maschinenstillstands-

zeit und Ablegegeschwindigkeit verändert. Hierzu werden die Parameter in Anhang F auf 100 % definiert und sowohl prozentual erhöht als auch verringert.

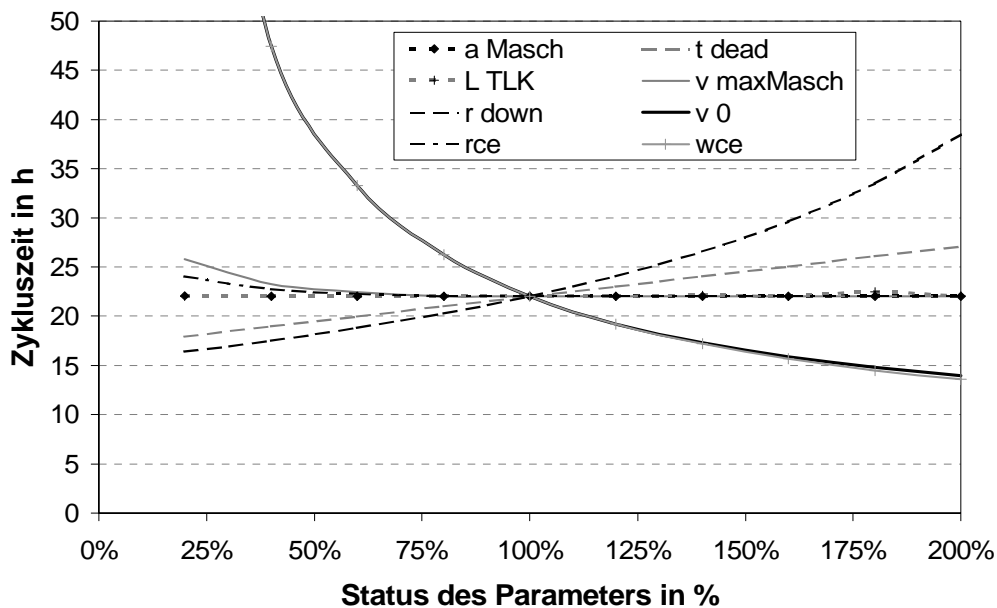


Bild 5.12: Sensitivitätsstudie für das Tapelegen in Bezug auf das V-22 Bauteil ($v_0 = 6$ m/min)

Bild 5.12 zeigt einen unterschiedlich starken Einfluss der Parameter. Während a_{Masch} und L_{TLK} bei dem gewählten Beispiel praktisch keinen Einfluss auf die Zykluszeit nehmen, haben die Ablegegeschwindigkeit und die Ablegebreite den nahezu gleichen und stärksten Einfluss. Einen ebenfalls starken Einfluss haben die Totzeit und noch stärker der Maschinenstillstandsanteil. Die maximale Maschinengeschwindigkeit und der Bauteil-Kantenradius haben nur einen Einfluss ab etwa unter 75 % des Ausgangswertes. Entsprechend diesen Ergebnissen kann der Prozess optimiert werden, um die Zykluszeit für ein Produkt weiter zu senken. Zusätzliche veränderliche Parameter sind die Anzahl der Lagen und der Faserwinkel. Diese Parameter lassen sich aber nicht ohne Beeinflussung der Lamineigenschaften verändern und sind daher Bauteil-spezifisch zu betrachten.

Ausgenommen des Maschinenstillstandsanteil ist der Anteil der einzelnen Parameter an der Zykluszeit insbesondere abhängig von der Grundgeschwindigkeit des Prozesses. In der Sensitivitätsstudie in Bild 5.13 wird daher ein v_0 von 15 m/min zu Grunde gelegt. Während die Reihenfolge der Einflussstärke gleich bleibt, ändert sich der prozentuale Einfluss. Durch die hohe Grundgeschwindigkeit haben die Parameter Able-

gegeschwindigkeit und die Ablegebreite einen geringeren Einfluss auf die Zykluszeit. Dagegen haben alle anderen Parameter einen stärkeren Einfluss. Während sich z.B. mit der Totzeit t_{dead} bei $v_0 = 6$ m/min die Zykluszeit um 23 % erhöhen bzw. um 18 % senken lässt, erhöhen sich die Werte bei 15 m/min auf 41 % bzw. 33 %. Für den Parameter Kantenradius r_{ce} ändern sich die Werte von 9,2 % und 0 % auf 16,2 % und 3,5 %. Beide Diagramme zeigen aber den sehr geringen Einfluss der maximalen Maschinenbeschleunigung a_{maxmasch} . Demnach könnten die beschleunigungsbezogenen Komponenten vernachlässigt und das Modell in diesem Fall vereinfacht werden.

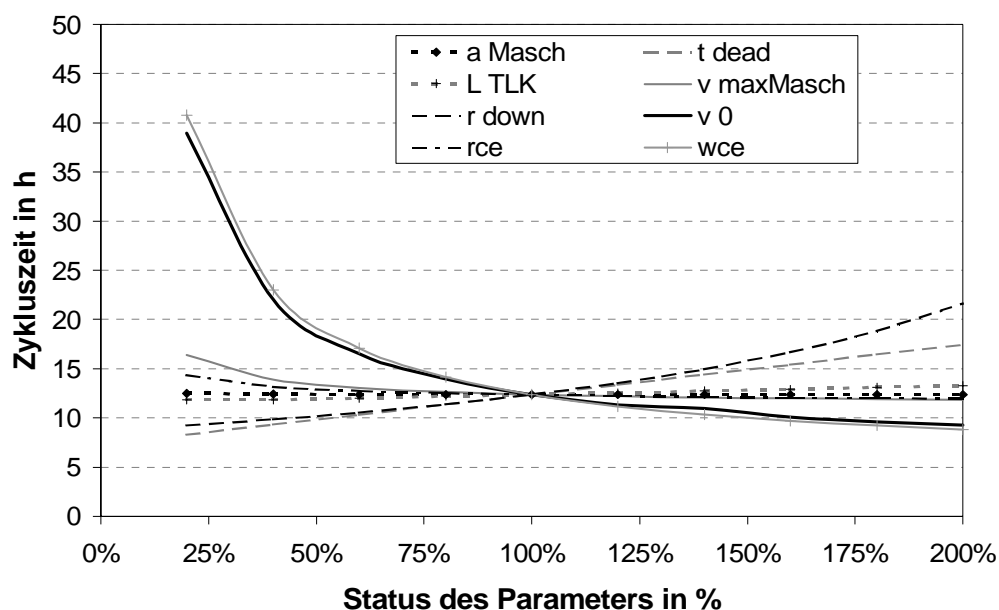


Bild 5.13: Sensitivitätsstudie für das Tapelegen in Bezug auf das V-22 Bauteil ($v_0 = 15$ m/min)

Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, ermöglicht das Modell eine systemindividuelle Bewertung von Anlagentechnik und Bauteil zur Optimierung der Zykluszeit sowie der Systemkomponenten.

6 Erweiterung des Bauteilspektrums durch Verfahrenskombination

In der bisherigen Form ist das Thermoplast-Tapelegeverfahren nicht für Bauteile z.B. der Automobilindustrie einsetzbar. Dort verwendete Strukturbauteile weisen eine höhere Formkomplexität und hohe Stückzahlen auf. Auf Basis der Ergebnisse zur strategischen Prozessanalyse (Kapitel 3.1) lässt sich diese Lücke durch Kombination von Tapelegen und Umformen thermoplastischer Materialien schließen. Während das Tapelegen für die beanspruchungsgerechte lokale Verstärkung eines flächigen Halbzeugs sorgt, kann durch Einsatz des Umformens die erforderliche Formkomplexität des Bauteils und Zykluszeit erreicht werden [133]. Gemäß Bild 6.1 wird dabei als Halbzeug ein vollimprägniertes und konsolidiertes flächiges Halbzeug (Organoblech [134]) verwendet. Dieses wird in der ersten Stufe mit Hilfe des Thermoplast-Tapelegeprozesses lokal verstärkt. Auf diese Weise können die sonst nur lagenweise als Gewebe oder Gelege angeordneten Verstärkungsfasern entsprechend der Lasttrichtung lokal durch unidirektionale Fasern belegt werden. Im Vergleich zum manuellen Auflegen der Verstärkungslagen gewährleistet der Einsatz des Roboters mit Tapelegekopf eine höhere Genauigkeit und Reproduzierbarkeit sowie einen geringeren Zeitbedarf. Zudem können sich die applizierten Tapes nicht mehr lösen, da die Tape-Lagen bereits mit dem Organoblech (vor-)konsolidiert werden.

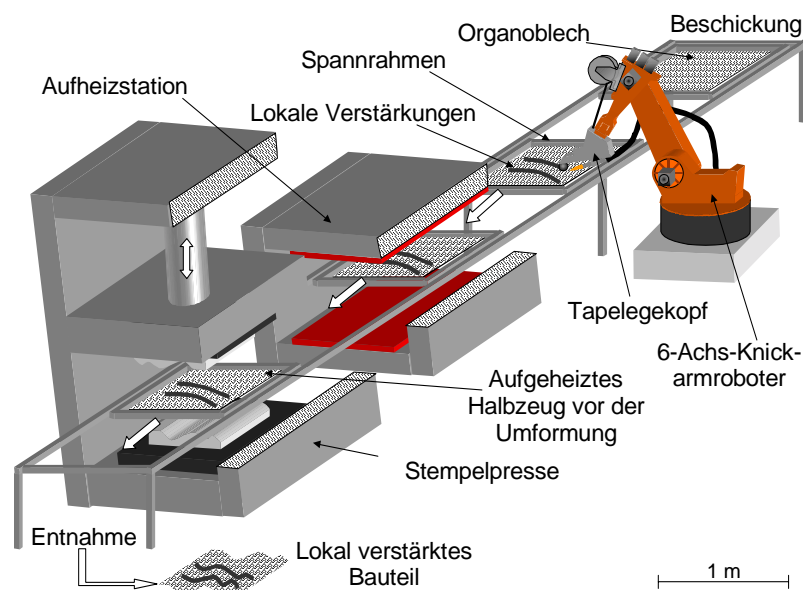


Bild 6.1: Prozesskette zur automatisierten Herstellung von Tailored Blanks aus FKV

Eine Vollkonsolidierung ist dabei nicht zwangsweise erforderlich, da nur eine Fixierung bis zum eigentlichen Umformen erreicht werden muss, so dass im Vergleich zum normalen Tapelegen mit Vollkonsolidierung deutlich höhere Ablegeraten möglich sind. Im Anschluss daran durchläuft das lokal verstärkte Halbzeug eine Aufheizstrecke (z.B. Infrarotofen), in der es bis über Schmelztemperatur erhitzt wird. Im aufgeschmolzenen Zustand wird es direkt in die Umformanlage transportiert. Dort erfolgt die Umformung. Der für die Umformung zur Induzierung der Membranspannung erforderliche Spannrahmen kann von Beginn bis Ende der Prozesskette als Halbzeugaufnahme- und Transportmittel eingesetzt werden. Daher entsteht als manuelle Tätigkeit lediglich die Beschickung und Entnahme des Spannrahmens, der außerhalb der Prozesskette gerüstet werden kann.

Im Rahmen von ersten Tests wurden am IVW gewebeverstärkte Organobleche aus GF/PP (35 % Faservolumengehalt) lokal durch Tapelegen mit GF/PP-Tapes (36 % Faservolumengehalt, Querschnitt 0,4 mm x 5 mm) lokal verstärkt und anschließend umgeformt. In Bild 6.2a ist eine einlagige Kreuzverstärkung mit einer Breite bzw. Länge von jeweils 50 mm bzw. 500 mm dargestellt. Die Ablegegeschwindigkeit betrug dabei 8 m/min. Das lokalverstärkte Organoblech wird in einem Spannrahmen mit Hilfe einer Stempelpresse (Bild 6.2b) bei 20 bar umgeformt. Als Oberwerkzeug wird ein Siliconstempel benutzt. Spätere Untersuchungen haben aber gezeigt, dass bei einlagigen Verstärkungen (hier 0,3 mm) ein Metallstempel weiterhin einsetzbar ist. Bild 6.2c zeigt das umgeformte Blech in der Draufsicht. Die lokalen Verstärkungen haben weder den Umformvorgang bzw. die Gewebescherung behindert noch sind die Verstärkungslagen verrutscht oder haben sich negativ auf die Bauteilqualität ausgewirkt. Die unidirektional faserverstärkten Tapes haben sich auch in den Sicken der Kontur angepasst [135].

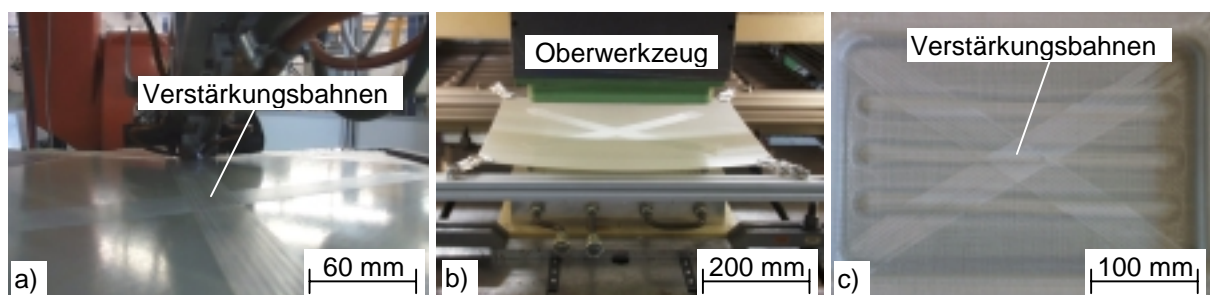


Bild 6.2: Thermoplast-Tapelegekopf zum Aufbringen lokaler Verstärkungen a) sowie ein lokal verstärktes Organoblech vor der Umformung b) und danach c)

7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war, einen Beitrag zur Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung großflächiger Strukturbauteile aus unidirektional faserverstärkten Thermoplast-Tapes zu leisten. Nach einer strategischen Prozessanalyse im Vergleich mit etablierten Fertigungsverfahren eignet sich das Thermoplast-Tapelegeverfahren besonders für großflächige, hochbeanspruchte Bauteile des Hochpreissegments mit geringer Formkomplexität. Hinsichtlich verwendeter Halbzeuge, Anlagentechnik und verfügbarer Modelle zur Prozessbeschreibung weist das Verfahren noch zahlreiche Defizite auf.

Die Erzielung kurzer Fertigungszeiten bedarf eines qualitativ hochwertigen Halbzeugs. Zur Analyse der Halbzeugqualität werden Qualitätskriterien für faserverstärkte Thermoplast-Tapes ermittelt und mit Hilfe einer neuen Systematik experimentell untersucht. Dabei zeigen sich Eigenschaften der Tapes wie undefinierte Tapekanten, hohe Oberflächenrauigkeit, unzureichende Faserstreckung und Imprägnierung. Auf Basis dieser Untersuchungen wird ein Qualitätskennzahlensystem zur Verdichtung der Tape-Eigenschaften entwickelt und ein Vorschlag zur Wareneingangsprüfung vorgelegt. Orientiert an einer hohen Bauteilqualität lassen sich bisher keine Halbzeuganforderungen quantifizieren, da die einzelnen Einflüsse nicht losgelöst voneinander bewertet werden können. Neben den Forderungen einer vollständigen Imprägnierung und gleichmäßigen Faserverteilung hat die Geometrie der Tapes einen bedeutenden Einfluss auf die spätere Laminatqualität. Tapebreite und -dicke sollten möglichst konstant sowie die Kanten der Tapes möglichst konstant rechteckig sein.

Zur Anhaftung der ersten Tape-Lage auf der Werkzeugplattform wurden Lösungskonzepte auf Basis der elektrostatischen Anziehung und der Adhäsion zwischen Thermoplast und metallischer Werkzeugplattform entwickelt. Die Adhäsion/Dehäsion wird dabei mit Hilfe einer materialspezifischen Werkzeugtemperierung induziert. Versuche belegen die Einsetzbarkeit dieser Technik. Bei diesen Experimenten zeigt sich auch die Bedeutung der Werkzeugtemperierung zur Erzeugung eines eigenspannungsfreien, vollkonsolidierten Laminats. Neben einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Aufheizsysteme erfolgte eine Untersuchung der Systemkomponenten Flamme, Konsolidierungsrolle und Werkzeugplattform sowie eine Empfehlung zu deren Regelung.

Zur Prozessentwicklung wurden umfangreiche Ablegeversuche zum Verhalten der Tapes beim Konsolidieren oder Legen von gekrümmten Bahnen durchgeführt. Die Geometrie des Halbzeugs wird beim geraden Ablegen durch den hohen Faservolumengehalt und die hohe Schmelzviskosität kaum verändert, so dass Überlappungen und deformierte Tapeanten Lunker im Laminat nach sich ziehen können. Beim Ablegen von gekrümmten Bahnen zeigt das Tape unterschiedliche Formen und Zonen der Faltenbildung. Zur Abschätzung des Maschinenparameters „Ablegebreite“ wurde ein einfaches Modell zur Berechnung der Ondulations-Amplitude entwickelt.

Zwecks Weiterentwicklung der Anlagentechnik wurde ein neuer Tapelegekopf konstruiert. Dieser weist durch Verwendung neuer Komponenten eine höhere Flexibilität und verbesserte Reproduzierbarkeit auf. Der Tapelegekopf ist steuerungstechnisch in ein Feldbussystem integriert. Erste Ansätze des Qualitätsmanagements runden die Verfahrensentwicklung ab.

Zur Unterstützung von strategischen Entscheidungen durch Generierung bauteilbezogener Fertigungszeiten wurde ein neues Modell entwickelt. Dieses Modell bezieht die Bauteilformkomplexität als wesentlichen Zeittreiber kontinuierlich mit ein. Die Bauteilformkomplexität ist ein relativer Parameter, der sich aus der Interaktion der beiden Systeme Bauteil und Fertigungsverfahren mit Hilfe der Informationstheorie quantifizieren lässt. Die Anzahl und Dauer von Kantenüberquerungen stellen das Komplexitätsmaß für den Tapelegeprozess dar. Das entwickelte Modell kann somit unabhängig von empirischen Daten für beliebige Bauteile angewendet werden. Zum Vergleich von Duroplast- und Thermoplast-Tapelegen erfolgte abschließend eine Anwendung des Modells auf ein Flugzeugbauteil.

Zusätzliche Verfahrenspotenziale werden durch die Kombination des Tapelege- mit dem Umformverfahren aufgezeigt.

Die mit dieser Arbeit gewonnenen neuen Erkenntnisse ermöglichen eine praxisgerechte Weiterentwicklung des Thermoplast-Tapelegeprozesses sowie eine Bauteil-individuelle Prozessabbildung und -einordnung.

Literaturverzeichnis

- [1] Bullinger, H.-J.: Einführung in das Technologiemanagement. Stuttgart: B. G. Teubner Verlag 1994.
- [2] Eddington, J. W.: It's your future – Take it. Materials World (1998) vol. 6, No. 7, S. 415-418
- [3] Kisch, R.: Automated Fiber Placement. Vorlesung. Ramulu M.: ME518 Seminar 2, 6. April 2000, Seminars in Manufacturing Management, Universität Washington.
- [4] Pirrung, P. F.: Machines automate tape layup. Advanced Materials and Processes (1989) Nr. 12, S. 43-47.
- [5] Kanbeo, S. W.: V-22 modifications focus on cost, productivity. Aviation Week & Space Technology (1995) 22. Mai, S. 36-36.
- [6] Benjamin, W. P.: The fiber placement path toward affordability. Sampe Journal (1998) Vol. 34, No. 3, S. 10-16.
- [7] Gutowski, T. G.: Advanced Composites Manufacturing. New York: John Wiley & Sons 1997.
- [8] Bäumer, T.: Verarbeitungs- und Anlagentechnik für die Herstellung langfaserverstärkter Faserverbundbauteile im Wickel- und Legeverfahren. Dissertation. Aachen: Shaker Verlag 1992.
- [9] Neitzel, M.; Breuer, U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. München: Carl Hanser Verlag 1996.
- [10] Zender, H.: Einsatz von Industrierobotern zur Fertigung von Faserverbundbauteilen im Wickel- und Tapelegeverfahren. Dissertation. Aachen: Shaker Verlag 1992.
- [11] Steiner, K. V.: Einsatz einer robotergesteuerten Anlage zum Bandablegen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen. Dissertation. Universität Kaiserslautern. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2/Nr. 369, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.

- [12] Kitson, L.; Johnson, B.: Fiber placement technology advancements at Boeing Helicopters. American Helicopter Society, 51st Annual Forum. Fort Worth, TX, USA, 9.-11. Mai 1995, S. 69-79.
- [13] Evans, D. O.; Vaniglia, M. M.; Hopkins, P. C.: Fiber placement process study. 34th SAMPE Symposium, 8.-11. Mai 1985, S. 1822-1833.
- [14] Klenner, J.: Bewertungs- und Auswahlalgorithmen kostenoptionaler Prepreg-Applikationsverfahren im Rahmen der Fertigung hochbelasteter Flugzeugbauteile aus faserverstärktem Kunststoff. Dissertation. TU Braunschweig, 1989.
- [15] Eaton, H. L.: Composite tape preparation and application. Offenlegungsschrift, US 4491493. USA, 8.4.1983.
- [16] August, A; Huber, J. G.: Gantry for use in the manufacture of laminar structures. Patent, US 4.208.238. Grumman Aerospace Corporation, 1. Mai 1978.
- [17] Pirrung, P. F.: Machines automate tape layup. Advanced Materials and Processes (1989) Nr. 12, S. 43-47.
- [18] Carlson, D.; Breda, B. J.: Fabrication of the BA 609 wing skin. American Helicopter Society, 55th Annual Forum, 25.-27. Mai 1999, Montreal, Quebec, Kanada, S. 777-782.
- [19] Land, I. B.: Design and manufacture of advanced composite aircraft structures using automated tow placement. Master-Thesis. M.I.T., Boston, MA, USA, 6/96.
- [20] Breda, B. J.; Stump; K. H.: A case study of controlled tape laying. American Helicopter Society, 52nd Annual Forum. Washington D.C., USA, 4.-6. Juni 1996, S. 603-610.
- [21] N.N.: Automated tape-laying excels for F-22's wing skin panel. High-Performance Composites (1999) Nr. 5, S. 27-30.
- [22] Enders, M. L.: The fiber-placement process. Tsai, S. W.; Springer, G. S. (Hrsg.) ICCM 8, Composites, vol. 2, sections 12-21. Honolulu, 18.-19. Juli 1991, S. 14B1-14B11.

- [23] Evans, D. O.: Design considerations for fiber placement. 38th SAMPE Symposium, 10.-13. Mai 1993, S. 170-181.
- [24] Pinckney, R. L.: Fabrication of the V-22 composite aft fuselage using automated fiber placement. NASA-Larc, The First NASA Advanced Composite Technology Conference, part 1, 1993, S. 385-397.
- [25] N.N.: Sampe Update: F-22 Raptor. High-Performance Composites (1998) Vol. 6, No. 4, S. 23.
- [26] N.N., Alliant Techsystems, <http://www.atk.com/convmunitions/Competencies/CMP/csc.htm>, 2001.
- [27] Hauptert, F.: Thermoplast-Wickeltechnik: Einfluß der Verarbeitungstechnologie auf Struktur und Eigenschaften kontinuierlich faserverstärkter Verbundwerkstoffe. Dissertation. Universität Kaiserslautern. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2/Nr. 435, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- [28] Brandis, H.: Konzeption eines integrierten Tape-Legesystems für die Applikation nicht abwickelbarer Luftfahrzeugstrukturen aus faserverstärktem Kunststoff. Dissertation. TU München, 1991.
- [29] Wang, E. L.; Gutowski, T. G.: Laps and gaps in thermoplastic composites Processing. Composites Manufacturing (1991) Vol. 2, No. 2, S. 69-78.
- [30] Funck, R.: Entwicklung innovativer Fertigungstechniken zur Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Wickelverfahren. Dissertation. Universität Kaiserslautern. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2/Nr. 393. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- [31] Evans, D. O.: Fiber Placement. Cincinnati Milacron. Firmenbericht, 9.11.1995.
- [32] N.N.: Unidirektionalgelege Prepreg mit Polyetheretherketon-Matrix APC-2a und Kohlenstoffaser AS4. Daimler-Benz Aerospace Airbus. Werkstoff-Handbuch 75-T-2-0701-1-1, V2. Ausgabe 01.07.1997.
- [33] N.N.: Produktinformationen/Firmenprospekt. Cyttec Fiberite, 2000.
- [34] N.N.: SUPreM – Mechanical Properties. Produktinformationen/Firmenprospekt. Sulzer Composite, 2002.

- [35] N.N.: Product Information. Produktinformationen Tow Flex/applied Fiber Systems. Clearwater/Zürich.
- [36] N.N.: Product Information. Produktinformationen Flex Composites. Noordwijkerhout.
- [37] Maison, S.; Thibout, C.; Carrigues, C.; Garcin, J.-L.; Payeen, H.; Sibois, H.; Coiffer-Colas, C.; Vautey, P.; Boulnois, P.: Technical developments in thermoplastic composite fuselages. *Sampe Journal* (1998) Vol. 34, No. 5, S. 33-39.
- [38] Johnston, N.J. et. al.: Automated Fabrication of high performance composites: An overview of research at the Langley Research Center. International conference on composite Materials, Gold Coast, Australia, 14.-18. Juli 1997.
- [39] N.N.: Automated Fiber Placement Technology. Firmenprospekt. Automated Dynamics, 1999.
- [40] Hauber, D. E.; Hardtmann, D. J.; Bubeck, K. B.: Recent advances in thermoplastic composite fabrication using rows. 35th International SAMPE Symposium, 2.-5. April 1990.
- [41] N.N.: Fiber Placement Equipment from Automated Dynamics, <http://www.global2000.net/adc/fiber.htm>, 9.4.1999.
- [42] N.N.: Automated Fiber Placement Equipment, <http://www.automateddynamics.com/applications.htm>, 10.10.2001.
- [43] N.N.: Press Releases, http://www.automateddynamics.com/press_releases.htm, 10.10.2001.
- [44] Pasanen, M. J.; Martin, J. P.; Lagone, R. J.; Mondo, J. A.: Advanced composite fiber placement: process to application. Artikel als Download auf <http://www.automateddynamics.com>, 10.10.2001.
- [45] N.N.: Automated Fiber Placement Technology, Firmenprospekt. Automated Dynamics, 2001.
- [46] Ahrens, M.; Mallik, V.: Automated manufacturing of carbon fibre reinforced thermoplastics. *Advanced Composites Bulletin* (1998) Nr. 8, S. 7-8.

- [47] Mallick, V.: Thermoplastic composite based processing technologies for high performance turbomachinery components. *Composites Part A* (2001) 32, 1167-1173.
- [48] Ahrens, M.: Fibre placement offers cheaper composites. *Reinforced Plastics* (1998) Vol. 42, Nr. 6, S. 25.
- [49] Ahrens, M.; Mallick, V.; Parfrey, K.: Roboter legen Thermoplastfasern in Verbundwerkstoffe ein. *ABB Technik* (1998) Nr. 2, S. 27-34
- [50] Aérospatiale Societe National: Industrielle Verfahren zur Herstellung von Verbundgegenständen mit thermoplastischer Matrix. Patentanmeldung: EPA 998383.
- [51] Johnston, N. J.: Thermoplastic composite fabrication by automated robot heated head technology. <http://larcpubs.larc.nasa.gov/randt/1995/SectionB1.fm514.htm>, 11.3.1999.
- [52] Stuart, M. J.; Johnston, N. J.; Dexter, H. B.; Marchello, J. M.; Grenoble, R. W.: Automated fabrication technologies for high performance polymer composites. AGARD spring '98 Workshop on Intelligent Processing of high performance Materials, Brussels, Belgium, 11.-15. Mai 1998, S. 14-1 – 14-11.
- [53] Grenoble, R. W.; Messier, B. C.; Marchello, J. M.; Belvin, H. L.; Johnston, N. J.: Adhesive Bonding of composite ribbon during automated tow placement. *Sampe Journal* (1998) Vol. 34, No. 3, S. 56-61.
- [54] Costen, R. C.; Marchello, J. M.: Sensitivity studies for in-situ automated tape placement of thermoplastic composites. 42. SAMPE Symposium, 4.-8. Mai 1997, S. 33-47.
- [55] Costen, R. C.; Marchello, J. M.: Start-on-the-part Transient Model for in-situ automated tape placement of thermoplastic composites. 43. SAMPE Symposium, 31. Mai - 4. Juni 1998.
- [56] Costen, R. C.; Marchello, J. M.: Tape-drop Transient Model for in-situ automated tape placement of thermoplastic composites, 44. SAMPE Symposium, Mai 1999, S. 44-58.
- [57] Heider, D.; Foulk, R. M.; Gillespie, J.W. Jr.: Adaptive Temperature Control for the thermoplastic Tow-Placement Process. Kliger, H. S.; Rasmussen, B. M.;

- Pilato, L.; Tolle, T. (Hrsg.). SAMPE Symposium - Materials and process affordability keys to the future, vol. 43, 1998, S. 214-224.
- [58] Tierney, J.; Eduljee, R. F.; Gillespie, J. W. Jr.: Control of warpage and residual stresses during automated tow placement process. (Hrsg.) Kliger, H. S.; Rasmussen, B. M.; Pilato, L.; Tolle, T. Sampe Symposium - Materials and process affordability keys to the future, vol. 43, 1998, S. 652-664.
- [59] Heider, D.; Piovoso M. J.; Gillespie J. W. Jr.: Intelligent Control of the Thermoplastic Composite Tow-Placement Process. Journal of Theroplastic Composite Materials (1998) vol. 11, S. 573-595.
- [60] Butler, C. A.; McCullough, R. L.; Pitchumani, R.; Gillespie J. W. Jr.: An analysis of Mechanisms governing fusion bonding of thermoplastic composites. Journal of thermoplastic composite materials (1998) vol. 11, S. 338-363.
- [61] Steiner, K. V.; Bauer, B. M. ; Pitchumani, R.; Gillespie, J. W. Jr.: Experimental verification of modelling and control for theroplastic tow placement. 40. SAMPE Symposium, 8.-11. Mai 1995, S. 1550-1551.
- [62] Don, R. C.; Holmes, S. T.; Steiner, K. V.; Gillespie, J. W. Jr.: Integrated process models for control of thermoplastic tow Placement with on line consolidation. 25. SAMPE technical conference, 26.-28. Oktober 1993, S. 713-824.
- [63] Zender, H.: Einsatz von Industrierobotern zur Fertigung von Faserverbundbauteilen im Wickel- und Tapelegeverfahren. Dissertation. RWTH Aachen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2/Nr. 250, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- [64] Lamontia, M. A.; Cope, R. D.; Gruber, M. B.; Waibel, B. J.; Pratte J. F.: Stringer-, Honeycomb-, and TIGR-stiffened skins, and ring-stiffened cylinders fabricated from automated thermoplastic fiber placement and filament winding. 23. International SAMPE Europe Conference, Paris expo Porte de Versailles, Paris, 9. – 11. April 2002, S. 213-224.
- [65] Lamontia, M. A.; Gruber, M. B.; Waibel, B. J.; Cope, R. D.; Hulcher A. B.: Conformable compaction system used in automated fiber placement of large composite aerospace structures. 23. International SAMPE Europe Conference, Paris expo Porte de Versailles, Paris, 9. – 11. April 2002, S. 745-756.

- [66] Schmidt, R.: Einsatz von Hochleistungslasern für die Fertigung von Faser-verbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix im Wickelverfahren. Disserta-tion. RWTH Aachen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2/Nr. 321, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- [67] Weck, M: Verarbeitungsverfahren für faserverstärkte Thermoplaste. Informa-tionsblatt des IPT, RWTH Aachen, 1998.
- [68] Weck, M. (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 332 – Produktionstechnik für Bauteile aus nichtmetallischen Faserverbundwerkstoffen, Arbeits- und Er-gebnisbericht 1993-94-95, Teilprojekt-Nr. 4, Thema: Maschinenentwicklung, RWTH Aachen, 1995, S. 275-289.
- [69] vor dem Esche, R.: Legeverfahren zur Herstellung langfaserverstärkter Thermoplastbauteile. Informationsblatt des IPT, RWTH Aachen, 1998.
- [70] vor dem Esche, R.: Herstellung langfaserverstärkter Thermoplastbauteile unter Zuhilfenahme von Hochleistungslasern als Wärmequelle. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen: Shaker Verlag, 2001
- [71] Weck, M.; vor dem Esche, R.: Neue Wege zur Verarbeitung von Faserver-bundkunststoffen. Weck, M. (Hrsg.): Industrielle Anwendung der Faserver-bundtechnik III, Tagungsband, Fachtagung am 5./6. Oktober 1998, RWTH Aachen, S. 125-128
- [72] Corsten, H.: Produktionswirtschaft. 7. Auflage. München/Wien: Oldenbourg Verlag, 1998.
- [73] Beresheim, G.; Lichtner, J., Mitschang, P.; Neitzel, M.: Thermoplast-Tapelegen – Durch Weiterentwicklung der Thermoplast-Wickeltechnik zu neuen Produktpotentialen. AVK-TV Tagung, 12.-13.9.2000, Baden-Baden.
- [74] Corsten, H.: Grundlagen und Elemente des Prozeßmanagement. Schriften zum Produktionsmanagement Nr. 4. Kaiserslautern, 1996, S. 6-24.
- [75] DIN 19226-1: Leittechnik, Regelungstechnik, Steuerungstechnik; Allg. Grundbegriffe, 02/94, S. 3.
- [76] Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 4. Auf-lage. München: Wittemann, 1976.

- [77] Daenzer, W. F.; Büchel, A. (Hrsg.): Systems engineering: Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben. 6. Auflage. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1989.
- [78] Kosiol, E.; Szyperski, N.; Chmielewicz, K.: Zum Standort der Systemforschung im Rahmen der Wissenschaften. Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (1965) 17. Jahrgang, S. 337-378.
- [79] Spur, G.; Mertins, K.; Jochem, R.: Integrierte Unternehmensmodellierung. Warnecke, H. J. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 1993.
- [80] Wolffgramm, H.: Technische Systeme. Hildesheim: Verlag Franzbecker, 1997.
- [81] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [82] Hornbostel, D.: Methoden zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1995.
- [83] Ehlers, C.: Beitrag zur Qualitätssicherung bei der Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste. Dissertation. Universität Kaiserslautern. VDI Fortschritt-Berichte. Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 463. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.
- [84] Butler, C. A.; McCullough, R. L.; Pitchumani, R.; Gillespie Jr., J. W.: An analysis of Mechanisms governing fusion bonding of thermoplastic composites. Journal of thermoplastic composite materials. (1998) Vol. 11., S. 338-363.
- [85] Lutz, A.: Beitrag zur Entwicklung innovativer Fertigungstechniken für die Verarbeitung thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe. Dissertation. Universität Kaiserslautern. Berlin: Mensch & Buch Verlag, 1999.
- [86] Bamberg, G.; Bauer, F.: Statistik. 9. Auflage. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1996.
- [87] Mayer, C.: Prozessanalyse und Modellbildung bei der Herstellung gewebeverstärkter, thermoplastischer Halbzeuge. Dissertation, Universität Kaiserslautern. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Schriftenreihe: Kaiserslautern, Band 5, 1999.

- [88] Ferreira, M.; Lam, T. M.; Koncar, V.; Delvael, Y.: Nondestructive testing of polyaramide cables by longitudinal wave propagation: study of the dynamic modulus. *Polymer Engineering and Science*. (July 2000) Vol. 40, No. 7, S. 1628-1634.
- [89] Eberhardt, C. N.; Clarke, A. R.: Quantifying the error in fibre orientation measurement and its application to evaluating numerical simulations. *Proceedings. ICMAC – International Conference for Manufacturing of Advanced Composites*. Belfast, 2001, S. 141 - 150
- [90] DGQ-Schrift Nr. 14-23: Qualitätskennzahlen und Qualitätskennzahlensysteme. 1. Auflage. Berlin: Beuth Verlag, 1984.
- [91] Bussiek, J.; Fraling, R.; Hesse, K.: Unternehmensanalyse mit Kennzahlen. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1993.
- [92] Meyer, K.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen und Kennzahlensysteme. 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer Poeschel Verlag, 1994.
- [93] Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
- [94] Kim, H. J.; Lee, W. I.; Sih, S. W.; Tsai, S. W.: Flow and heat transfer analyses during tape lay-up process of thermoplastic composite. I. Crivelli Visconti, ECCM-8, vol. 2, Cambridge, 1998, S. 631-636.
- [95] L. Dickinson, J. Deaton: Mechanical characterization of two thermoplastic composites fabricated by automated tow placement. NASA report (1995) vol. 1, part 2, S. 665-687.
- [96] Korn, J.; Lichtner, J.; Beresheim, G.: Verfahren zur Anhaftung von faserverstärkten Thermoplastbändern auf einer Werkzeugplattform. Deutsches Patent- und Markenamt. Patentnummer: 10012378, 2001.
- [97] Spülbeck, H.; Hartger, W.: Theoretische Elektrizitätslehre, Eine Einführung für Studierende und Ingenieure. Düsseldorf: Vieweg-Verlag, 1966.
- [98] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. 15. Auflage. Leipzig-Köln: Fachbuchverlag, 1995.

- [99] Brockmann, W.; Dorn, L.; Käufer, H.: Kleben von Kunststoffen mit Metall. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1989.
- [100] Habenicht, G.: Kleben. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1990.
- [101] Korn, J.; Lichtner, J.; Beresheim, G.: Verfahren zur Anhaftung von Thermoplastbändchen auf einer Werkzeugoberfläche. Deutsches Patent- und Markenamt. Anmeldenummer: 10129514.6, 2002.
- [102] Beresheim, G.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Erstmals konkave Strukturen. Kunststoffe 90 (2000) 4. München: Carl Hanser Verlag, S. 70.
- [103] Beresheim, G.; Latrille, M.; Schledjewski, R.: Auf dem Weg zur Automation. Kunststoffe 91 (2001) 12. München: Carl Hanser Verlag, S. 78.
- [104] Cerbe, G.; Charles, H.-P.; Krauf, G.; Köhler, H.; Lehmann, J.; Lethen, H.; Mauruschat, H.: Grundlagen der Gasetechnik: Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1982.
- [105] Latrille, M.; Beresheim, G.; Schledjewski, R.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Thermoplast-Tapelegen - Ein hochautomatisierbarer Verarbeitungsprozess für thermoplastische Bändchenhalbzeuge. DGLR-Tagung. Hamburg, September 2001.
- [106] Beresheim, G.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Geometric Potentials with Tape Placement of Fibre Reinforced Thermoplasts. International Meeting on Composite Materials, Mailand 9.-11. Mai 2000, S. 156-163
- [107] Beresheim, G.; Lichtner, J.; Schledjewski, R.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Thermoplast-Tapelegen. SAMPE Deutschland Konferenz, Kaiserslautern, 08.-09.03.2002.
- [108] Cogswell, F. N.: Thermoplastic Aromatic Polymer Composites. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
- [109] Gerd F. Kanniske, Jörg-Peter Bauer: Qualitätsmanagement von A-Z. München/Wien: Carl Hanser Verlag, 1993.
- [110] N.N.: Shearography. <http://www.lasertesting.co.uk/>. 10.05.2001
- [111] N.N.: Shearography. <http://www.trillon.com>. 10.05.2001

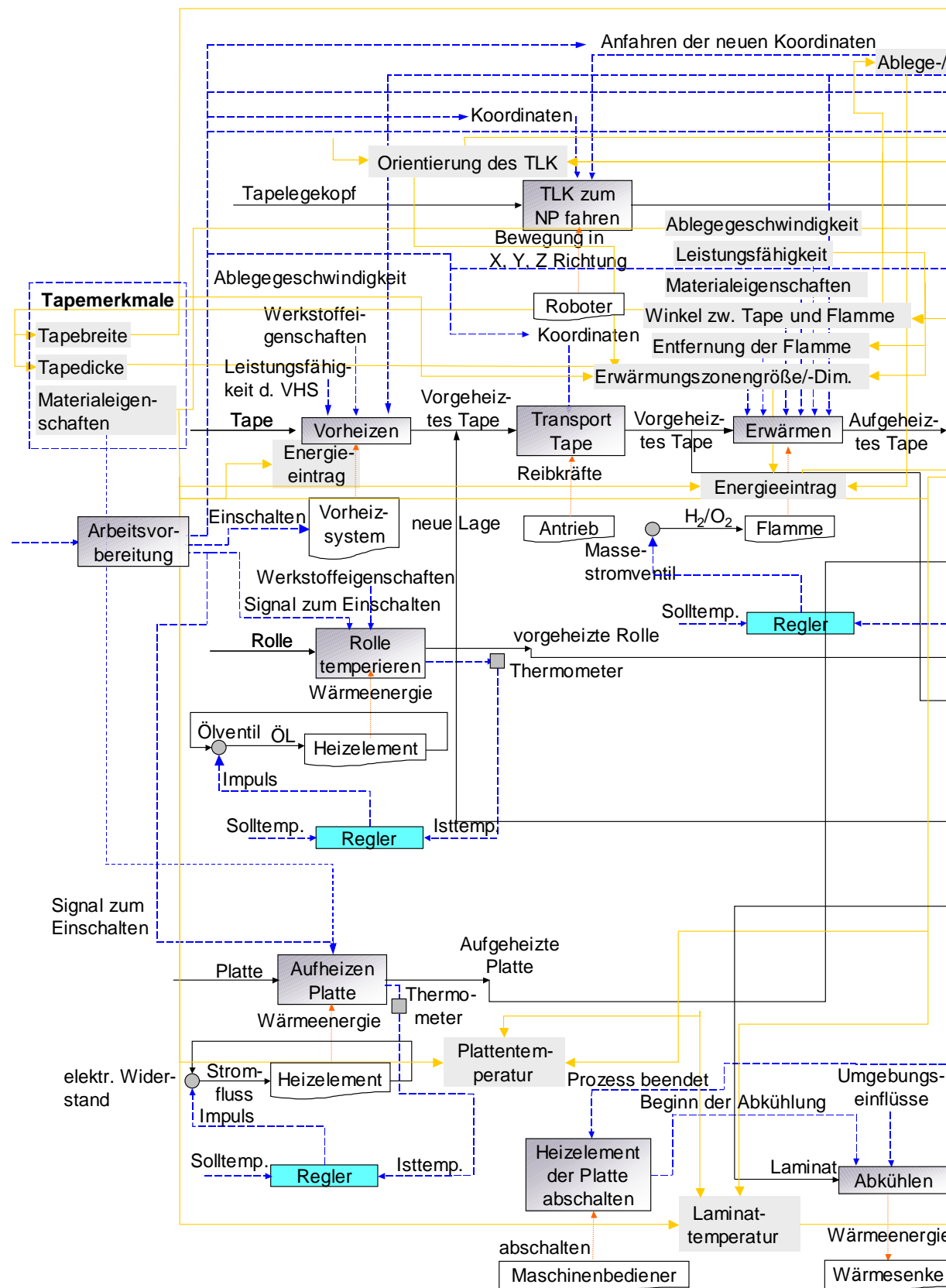
- [112] N.N.: Using shearography to find the flaws. <http://www.memagazine.org/bac-issues/february99/features/shearography/shearography.htm>. 10.05.2001
- [113] R. Pezzoni, R. Krupka: Laser-Shearography for nondestructive testing of large area composite helicopter structures. 15. WCNDT. <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn732/idn732.htm>. 10.05.2001
- [114] N.N.: Endoscopic Shearography Inspection. <http://www.nasatech.com/Briefs/Apr98/MFS26494.html>. 07.06.2001
- [115] Osten, W. et. al.: A shearography system for the testing of large scale aircraft components taking into account non-cooperative surfaces. Proceedings. 45th SPIE's Meeting San Diego, CA, 2000.
- [116] Osten, W.; Kalms, M.; Jüptner, W.: Some ways to improve the recognition of imperfections in large scale components using shearography. Interferometry '99: Applications. 10/20 - 10/23/99, Pultusk Castle, Polen, 1999, Nr. 3745-32.
- [117] Baumbach, T.; Osten, W.; Kalms, M.; Jüptner, W.: Entwicklung eines Shearographie-Prüfsystems als Fertigungsprüfverfahren von CFK-Monolithen und Sandwichstrukturen mit nicht-kooperativen Oberflächen. Ergebnisreview Meilenstein A2. Projekt CFK-Rumpf (Fkz 20W9904) AP 1.5.2 / 5.4 Shearographie. Bremen, 26.-29.11.2001.
- [118] Clark, J.; Field, F. R.: Process-based cost modeling: Understanding the economics of technical decisions. Vorlesungsskript, M.I.T., Wintersemester 2000.
- [119] Busch, J. V.; Field, F. R.: Technical cost modeling. Dominick V. Rosato, Daniel V. Rosato, A. C. Alberghini (Hrsg.): Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics: the complete blow molding operation. München/New York: Hanser Verlag, 1989.
- [120] de Neufville, R.; Clark, J.; Field, F. R.: Introduction to technical cost modeling – concepts and illustrations. Vorlesungsskript, M.I.T., Wintersemester 2000.
- [121] Joel Clark, Frank R. Field: Fundamentals in Process-Based Cost Modeling. Vorlesungsskript, M.I.T., Wintersemester 2000.
- [122] Wilson, D. R.: An exploratory study of complexity in axiomatic design. Dissertation, M.I.T., Boston, USA, 1980.

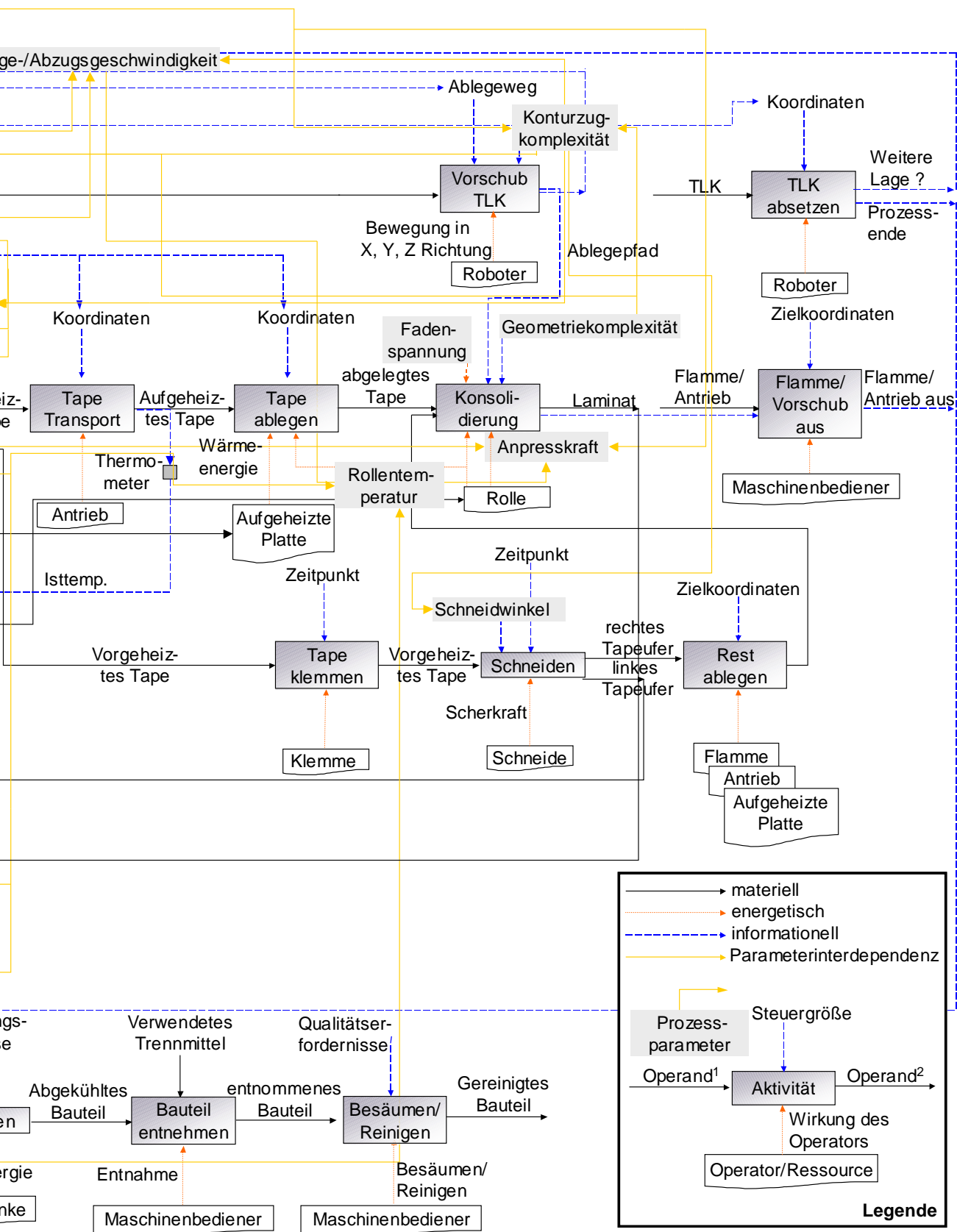
- [123] Kim, C. E.: Composites cost modeling: complexity. Master thesis, M.I.T., Boston, USA, 1993.
- [124] Beresheim, G.; Schledjewski, R.; Mitschang, P.: Part Complexity based cycle time estimation model for the thermoplastic tow placement process. Proceedings. 23. SAMPE Europe Conference, Paris expo Porte de Versailles, Paris, 9.-11. April 2002, S. 611-622.
- [125] Muter, S.: Cost Comparisons of alternative designs: An information based Model. Master thesis, M.I.T., Boston, USA, 1993.
- [126] Tse, M.: Design cost model for advanced composite structures. Master thesis, M.I.T., Boston, USA, 1992.
- [127] Tam, A. S.: A deformation Model for the Forming of aligned fiber composites, Dissertation, M.I.T., Boston, USA, 1990.
- [128] Shannon, C. E.; Weaver, W.: The mathematical theory of communication. Illini: Illini Books edition, 1963.
- [129] Neoh, E. T.: Adaptive framework for estimating fabrication time. Dissertation, M.I.T., Boston, USA, 1995.
- [130] Haffner, S; Gutowski, T.G.: Automated Cost Estimation for Advanced Composite Materials. NSF Conference Paper, 1998.
- [131] Gonzalez-Zugasti, J.: Computer modeling of advanced composites forming. Master thesis, M.I.T., Boston, USA, 1991.
- [132] Sawicki, A.; Schulze, E.; Fitzwater, L.; Harris, K.: Structural qualification of V-22 EMD tow placed aft fuselage. American Helicopter Society, 51st Annual Forum. Forth Worth, TX, USA, 9.-11. Mai 1995, vol. 2, S. 1641-1653.
- [133] Nowacki, J.: Prozessanalyse des Umformens und Fügens in einem Schritt von gewebeverstärkten Thermoplasten. Dissertation. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Schriftenreihe: Kaiserslautern, Band 24, 2001.
- [134] Breuer, U. P.: Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste. Dissertation, Universität Kaiserslautern. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2/Nr. 433, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.

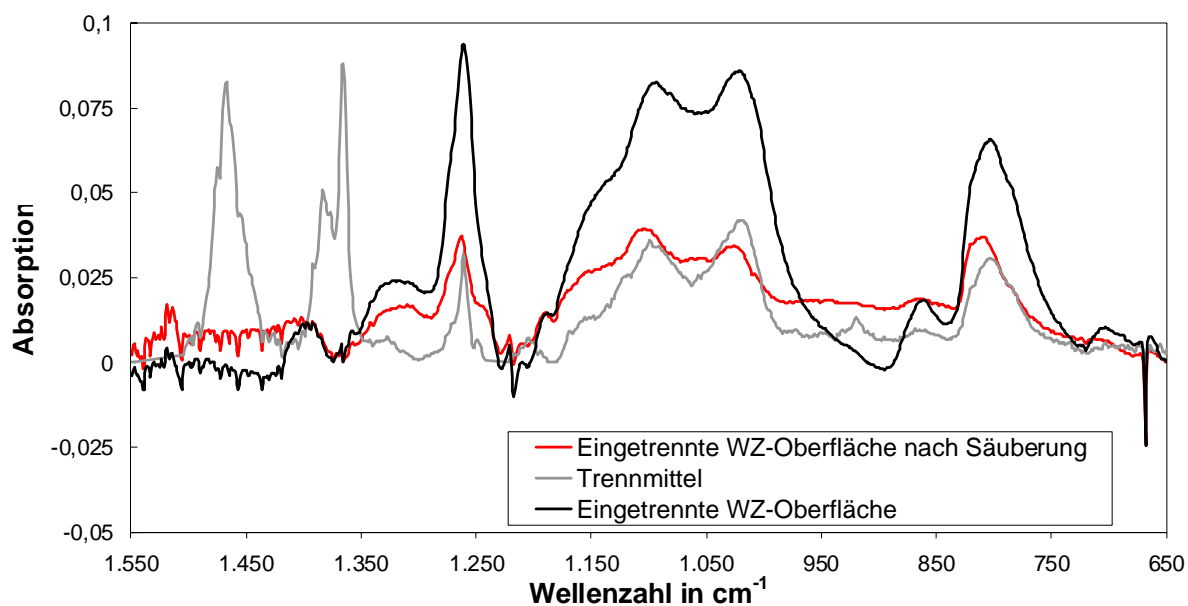
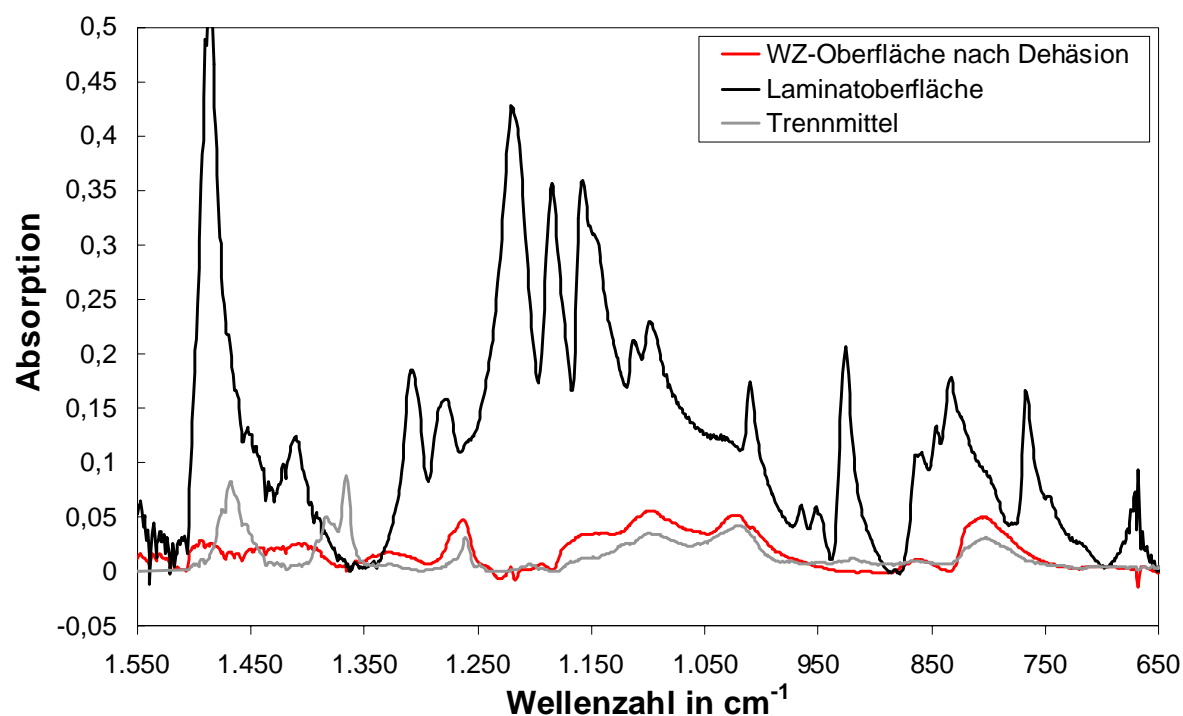
- [135] Beresheim, G.; Giehl, S.; Lichtner, J.: Automatische Verarbeitung von Organoblechen. MM Maschinenmarkt (2001) 47. Würzburg: Vogel Verlag und Druck GmbH, S. 40-43.

Anhang

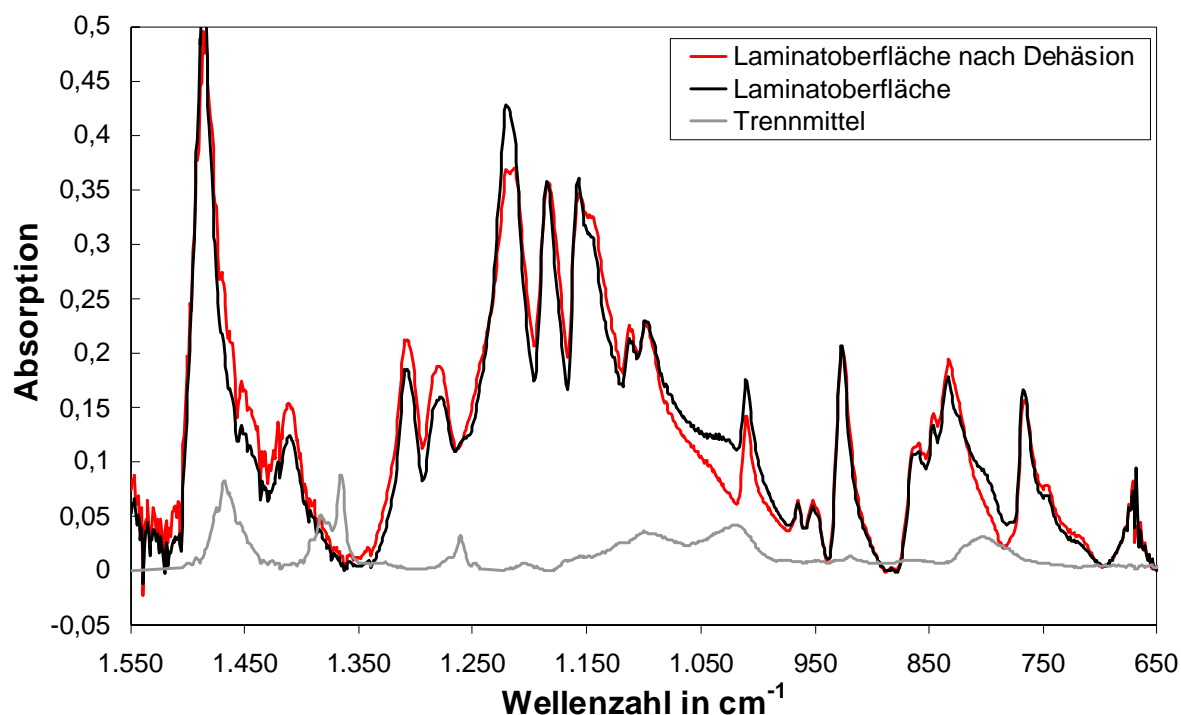
Anhang A: Darstellung des Thermoplast-Tapelegeprozesses auf Basis eines systemtheoretischen Ansatzes





Anhang B: Vergleich der FTIR-Spektren von Trennmittel und Werkzeug**Anhang C: Vergleich der FTIR-Spektren von Trennmittel, Laminat und Werkzeug**

Anhang D: Vergleich der FTIR-Spektren von Trennmittel und Laminat



Anhang E: Liste möglicher Fehler und QM-Instrumente für das Thermoplast-Tapelegen

Prozessschritt	Mögliche Fehler	Mögliche QM-Instrumente
1 Materialauswahl	Falsches Material ausgewählt	Bauteilanforderungen, Prozessinformationen, Halbzeuginformationen, Checkliste
2 Material bestellen	Falsches Material bestellt	Klare Anweisungen, Bestelllisten, Bestellformulare
3 Anlieferung	An den falschen Ort geliefert Verspätung, Beschädigung	Klare Angaben auf der Bestellung, eindeutige Kontrakte, spezielle Behältnisse/Transportgestelle
4 Eingangsprüfung	Ungenauere Tapedicke/-breite, unkonstante Tapedicke, nicht-rechteckige Tapekante, sehr raue Tapeoberfläche, unvollständige Imprägnierung, ungenauer Faservolumenanteil, unkonstanter Faservolumenanteil, Inhomogene Faserverteilung, Welligkeit der Fasern, zu geringe Zugfestigkeit/ Zugsteifigkeit/Zugdehnung/ Scherfestigkeit, Deformation durch Eigenspannung	Messschieber, Auflichtmikroskopie, Oberflächenprofilometrie, Ultraschall, Zugversuch, modifizierter Zugversuch, Schallemissionsmessung, ordnungsgemäße Lagerung
5 Lagerung	Beschädigung, Verunreinigung	Geschlossener Raum, separate Lagerung, Lagergestelle
6 Produktionsbereitstellung	Falsches Material/Bauteile, nicht ausreichend Material, zu spät, schlechte Handhabung, Spule nicht vollständig	Klare Beschriftung des Halbzeugs, Kanban-Steuerung, klarer Auftrag, Halbzeuglisten, Lagergestelle, Tapeanfang fixieren, Angabe der restlichen Tapelänge

Prozessschritt	Mögliche Fehler	Mögliche QM-Instrumente
7 Rüstvorgang	Knicken/Brechen des Tapes, falsches Einfädeln, Verletzung des Personals, zu früh/spät, Materialbeschädigungen, falsches Werkzeug, falscher/ungenauer Zusammenbau des Werkzeugs	Unterweisung des Personals, eindeutige Arbeitsanweisung, Sorgfalt bei der Handhabung, Maschinenstillstand sicherstellen, Kontrollleuchten, klar gekennzeichnete Werkzeuge, Kontrolle des zusammengebauten Werkzeugs evtl. Vermessung, Einspannungsvorrichtungen überprüfen
8 Bauteilkonstruktion	Nicht materialgerecht/fertigungsgerecht, falscher Lagenaufbau	Simultaneous Engineering, Nutzung von Pfadgenerierung und Simulation
9 Pfadgenerierung	Falsche Bedienung/ Parametrierung, falscher Lagenaufbau	Schulung des Personals
10 Prozesssimulation	Falsche Bedienung/Parametrierung	Schulung des Personals
11 Produktion	Zu heiß (Degradation)/zu kalt, zu schnell/langsam, zu viel/wenig Anpressdruck, zu viel Lücke/Überlappung, falsche Werkzeugtemperierung/-abkühlung, Bedienung-/Maschinenfehler, Materialanhaftungen an Konsolidierungsrolle oder Werkzeug, Störung durch Personalwechsel	Nutzen der Pfadgenerierung und Prozesssimulation, Funktionsfähigkeit der Maschine prüfen/überwachen, Kontrollleuchten, Prozessparameter überwachen, Maschinenprogramm kontrollieren, Verwendung geeigneter Halbzeuge, Dokumentation der Fertigungsschritte, Schulung des Personals, Kontrolle des Laminats nach jeder Lage, Schneidvorrichtung zum Entfernen des Stücks, Schallemissionsmessung, Ultraschall, Regelmäßige Wartung der Maschine zwischen und während der Produktion, Testläufe, Reinigung, Auftragen von Trennmittel, richtige Temperierung, definierte Schichtübergabe mit Checkliste
12 Bauteilentnahme	Beschädigung, Verletzung des Personals, zu früh/zu spät	Unterweisung des Personals, eindeutige Arbeitsanweisung, Sorgfalt bei der Handhabung, spezielle Handhabungsvorrichtung, Lagergestelle
13 Nachbearbeitung	Beschädigung, Arbeitsfehler	Unterweisung des Personals, eindeutige Arbeitsanweisung, Sorgfalt bei der Handhabung, spezielle Handhabungsvorrichtung, Lagergestelle
14 Bauteilprüfung	Zu viel Lücke/Überlappung, zu viele Poren, Verzug/Eigenspannung, zu raue Oberfläche, Delamination, falsche Kristallinität, falsche Bauteilbeschriftung	Ultraschall, Schallemissionsmessung, Squitter-Verfahren, Shearographie, Untersuchung von Proben mit Schlißbildern, Oberflächenprofilometrie, DSC, klare Bauteilkennzeichnung
15 Lagerung/Transport	Beschädigung, Verunreinigung	Geschlossener Raum, separate Lagerung, Lagergestelle, spezielle Behälter/Transportgestelle, Sorgfalt bei der Handhabung

Anhang F: Rahmendaten für die Berechnung der Zykluszeiten

		Duroplast	Thermoplast		Duroplast	Thermoplast
Psi	°	45	45		-45	-45
Lagenzahl		8	8		8	8
w	m	0,075	0,075		0,075	0,075
a Masch	m/s²	10	10		10	10
t dead	s	8	8		8	8
d KR	m	0,05	0,05		0,05	0,05
L TLK	m	0,7	0,7		0,7	0,7
Autoclave time	h	6	0		0	0
v maxMasch	m/min	120	120		120	120
r down	1/100	0,3	0,3		0,3	0,3
v 0	m/min	20	6,0		20	6,0
r ce,grenz konkav	mm	105,2	33,9		115,5	34,9
r ce,grenz konvex	mm	150,4	37,5		172,3	38,8
A	m²	20	20		20	20
n s		100	100		100	100
Kante 1		x	x		x	x
hq 1	m	3,1	3,1		3,1	3,1
Theta 1	°	90	90		90	90
alpha (für Xi Berechnung)	°	26,4	26,4		26,4	26,4
Xi	°	20,3	20,3		69,7	69,7
Theta Xi 1	°	131,5	131,5		104,2	104,2
wce	m	0,080	0,080		0,216	0,216
N ce 1		78	78		30	30
rce 1	mm	50	50		50	50
rce Xi 1	mm	50,00273669	50,00273669		50,14616216	50,14616216
v ce Xi konkav	m/min	9,0	6,0		8,6	6,0
v ce Xi konvex	m/min	7,8	6,0		7,5	6,0
l ce Xi	mm	83,7	83,7		226,4	226,4
l slow	mm	161,5	161,5		479,1	479,1
delta t ce konkav	min	0,0099	0,0000		0,0317	0,0000
delta t ce konvex	min	0,0126	0,0000		0,0397	0,0000
delta t a konkav	min	2,216E-04	0,000E+00		2,263E-04	0,000E+00
delta t a konvex	min	0,00024	0,00000		0,00024	0,00000
t a strip	min	0,00028	0,00008		0,00028	0,00008
delta t ce ges konkav	min	0,806	0,000		0,964	0,000
delta t ce ges konvex	min	1,018	0,000		1,205	0,000
Kante 2		x	x		x	x
hq 2	m	1,4	1,4		1,4	1,4
Theta 2	°	90	90		90	90
alpha (für Xi Berechnung)	°	0	0		0	0
Xi	°	45	45		45	45
Theta Xi 2	°	120,0	120,0		120,0	120,0
wce	m	0,106	0,106		0,106	0,106
N ce 2		28	28		28	28
rce 2	mm	50	50		50	50
rce Xi 2	mm	50,02	50,02		50,02	50,02
v ce Xi konkav	m/min	8,8	6,0		8,8	6,0
v ce Xi konvex	m/min	7,6	6,0		7,6	6,0
l ce Xi	mm	111,1	111,1		111,1	111,1
l slow	mm	236,1	236,1		236,1	236,1
delta t ce konkav	min	0,0152	0,0000		0,0152	0,0000
delta t ce konvex	min	0,0191	0,0000		0,0191	0,0000
delta t a konkav	min	2,216E-04	0,000E+00		2,263E-04	0,000E+00
delta t a konvex	min	0,00024	0,00000		0,00024	0,00000
t a strip	min	0,00028	0,00008		0,00028	0,00008
delta t ce ges konkav	min	0,437	0,000		0,437	0,000
delta t ce ges konvex	min	0,548	0,000		0,548	0,000
t p	h	11,38817	11,00847		5,42380	11,00847

Liste betreuter Studien- und Diplomarbeiten

Helge Ketelsen, 1998

Kostenanalyse unterschiedlicher Verwertungsverfahren für lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste.

Steffen Klein, 1999

Erfassung und Analyse der Produkt- und Prozesspotenziale des Tapelegeverfahrens für Thermoplaste.

Martin Daberkow, 1999

Analyse verschiedener Aufheizverfahren sowie Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur Bewertung deren Eignung für den thermoplastischen Tapelegeprozess.

Jüßen Fees, 1999

Ermittlung und Analyse der Prozessparameter sowie experimentelle Untersuchungen der Erwärmungszonengeometrien beim thermoplastischen Tapelegen.

Ramin Ghafari, 2000

Ermittlung und Analyse der Materialeigenschaften von kohlenstofffaserverstärktem Polyetheretherketon.

Jochen Korn, Jens Lichtner, 2000

Lösung des Erstlagenproblems für das Tapelegen von faserverstärkten Thermoplast-Bändchen.

Oliver Gratzel, 2000

Entwicklung und Umsetzung eines Instruments zum Technologiemanagement am Beispiel des Thermoplast-Tapelegeverfahrens.

Florian Huber, 2002

Analytische Untersuchung zu den Verarbeitungsparametern beim Thermoplast-Tapelegen.